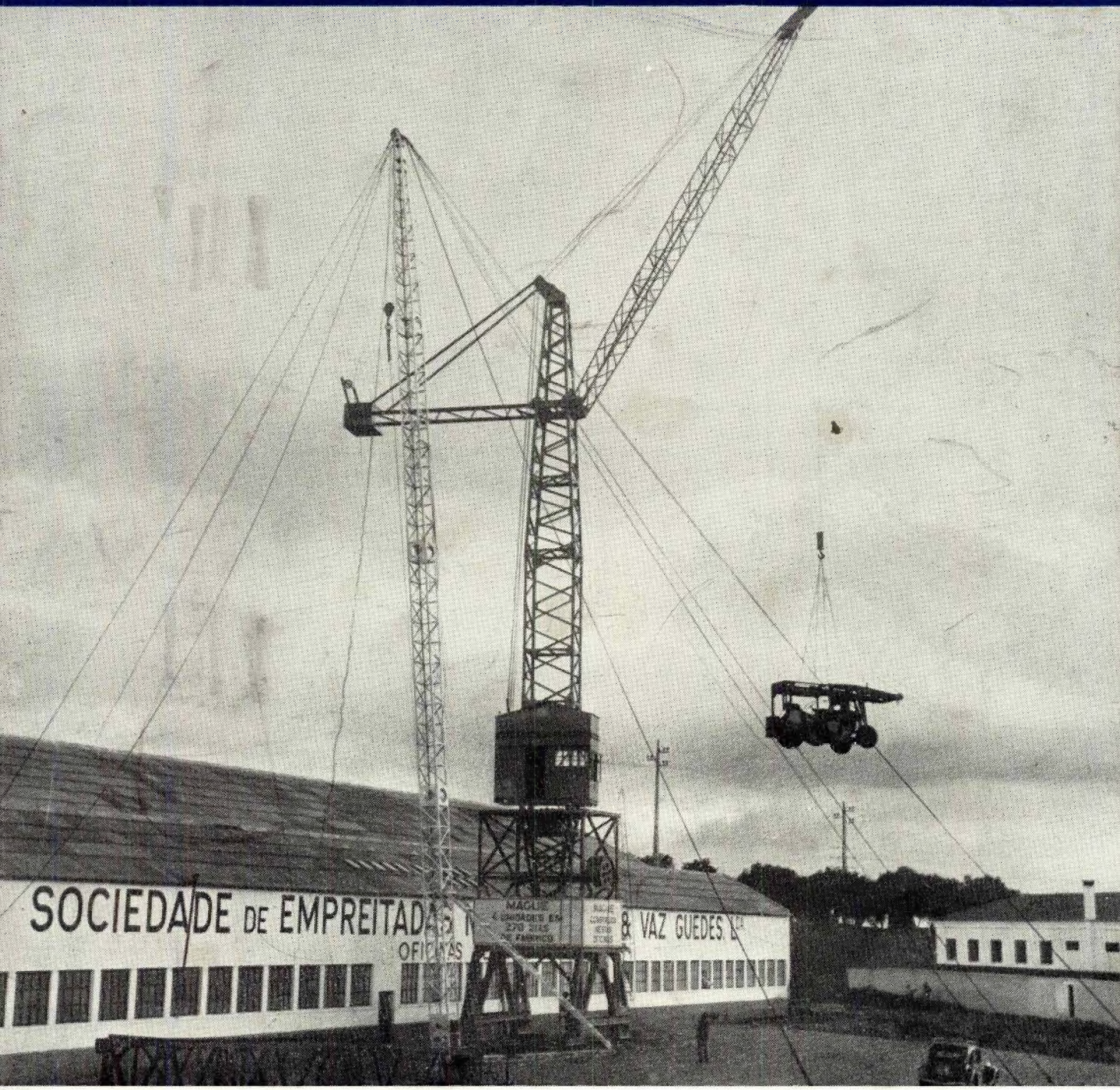
# TÉCNICA




REVISTA DE ENGENHARIA
DOS ALUNOS DO I. S. T.

N.º 240 - MARÇO - 1954

# CIMENTO SECIL

O CIMENTO COM AS MAIORES RESISTÊNCIAS

Fábrica no Outão — Setúbal

Lisboa — Rua do Comércio, 56-3.º

# ELECTRO-ARCO
LIMITADA

ELECTRODIOS
POSTOS E ACESSORIOS
PARA A SOLDADURA ELECTRICA

MATERIAL APROVADO PELO
LLOYD'S REGISTER OF SHIPPING

FÁBRICA E LABORATÓRIOS
VENDA NOVA — AMADORA
LISBOA
RUA SILVA CARVALHO, 239 — TEL 63649
PORTO
RUA DO BOLHÃO, 216 — TEL 21277

## Cimento «Liz» hidrofugado «N»

PRÓPRIO PARA

IMPERMEABILIZAÇÃO DE OBRAS

REBOCOS, FUNDAÇÕES, PAREDES, ETC.

Substitue com vantagem de ordem técnica e económica todos os impermeabilizadores conhecidos.

Em sacos de papel de 50 quilos

Peçam instruções para o seu emprêgo

Sede: Rua do Cais de Santarém, 64, 1.º — LISBOA
Filial: Rua de Santo António, 190-A, 1.º — PORTO

Agentes em todo o País

# TÉCNICA

REVISTA DE ENGENHARIA DOS ALUNOS DO INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

Ano XXIX - N.º 240 Março de 1954

Redacção e Administração: AVENIDA ROVISCO PAIS, I.S.T. * LISBOA-N. * TELEF. 70144 (Linha 50)

**DIRECTOR**
JOSÉ MANUEL DA CRUZ MORAIS

**ADMINISTRADOR**
FERNANDO MARQUES DE OLIVEIRA

**SECRETARIO**
VIRGÍLIO DOS REIS CARDOSO IGREJA

**CORPO REDACTORIAL**
ANTÓNIO SEVERINO PINTO
CARLOS M. NOGUEIRA MARTINS
JOÃO PEDRO ANTUNES GOMES
LUIZ F. LUCENA FERREIRA

*

NUMERO AVULSO 12$50

**ASSINATURAS:**

| | 3 N.os | 5 N.os | 10 N.os |
|---|---|---|---|
| Continente e Ilhas | 32$50 | 50$00 | 95$00 |
| Colónias Portuguesas e Estrangeiro | — | 55$00 | 100$00 |

*

**EDITOR E PROPRIETÁRIO**
ASS. DOS ESTUD. DO I.S.T.

*

COMPOSTO E IMPRESSO
NA
Tip. JORGE FERNANDES, L.DA
RUA CRUZ DOS POIAIS, 103
LISBOA

# SUMÁRIO

**CAPA — Ensaio de carga de uma das 4 gruas de 50 t/m, construídas nas Oficinas de S. E. Moniz da Maia e Vaz Guedes, Ltd.ª (Alverca) com destino às obras da Barragem do Limpopo. Altura máxima do gancho de carga, com 5 t, 41 m.**

Págs

**O valor da experiência na formação profissional**
Pelo Eng.º Quím.-Ind. Luís A. de Almeida Alves . . . . . 315

**Contribution à l'étude des systèmes ternaires de démixtion en milieu aquo-organique**
Par Pierre A. Laurent et J. P. Antunes Gomes . . . . . 319

**Conversores síncronos de frequência utilizados em sinalização telefónica**
Pelo Eng.º Electr. Manuel Abreu Faro . . . . . 327

Notas informativas — **Elementos sobre a produção e consumo de energia na rede eléctrica nacional** . . . . . 340

**Vista geral sobre o estado presente do método experimental de dimensionamento das estruturas**
Por Manuel Rocha . . . . . 341

**Alguns problemas de extensometria**
Pelo Eng.º Civil J. F. Lobo Fialho . . . . . 361

**Un grand chimiste disparait: James W. McBain**
Par Dr. Pierre A. Laurent . . . . . 374

**Do Mundo Técnico** . . . . . 377

**Biblioteca** . . . . . 379

OS ARTIGOS PUBLICADOS NESTA REVISTA SÃO DE EXCLUSIVA RESPONSABILIDADE DOS AUTORES

# FUNDAÇÕES FRANKI

Rua Sá da Bandeira

PORTO

2373 estacas FRANKI

Comprimento médio — 9 metros

SOCIEDADE
CONSTRUTORA
PORTUGUESA, L.DA
P. DO AREEIRO, 9, 4.º-E.
TELEF. 7 6061 - LISBOA

# TÉCNICA

DIRECTOR — JOSÉ M. CRUZ MORAIS ADMINISTRADOR — FERNANDO MARQUES DE OLIVEIRA
SECRETÁRIO: VIRGÍLIO DOS REIS CARDOSO IGREJA
CORPO REDACTORIAL — ANTÓNIO SEVERINO PINTO, CARLOS M. NOGUEIRA MARTINS, JOÃO PEDRO ANTUNES GOMES E LUIZ F. LUCENA FERREIRA

Ano XXIX - N.º 240 Março de 1954

C. D. 62.007.2

# O VALOR DA EXPERIÊNCIA NA FORMAÇÃO PROFISSIONAL

PELO ENG.º QUÍMICO-INDUSTRIAL LUÍS A. DE ALMEIDA ALVES
Professor do I. S. T.

A revista «Chemical Engineering» de Abril de 1947, pág. 98, publicou uma colecção de «Provérbios para os Jóvens Engenheiros», da autoria de Philip W. Swain, que já houve ocasião de citar noutro artigo (1) e dos quais se destacam agora os seguintes:

*«Raciocinar com números — no papel ou mentalmente — exactos ou aproximados — constitui a característica fundamental do engenheiro».*

*«As fórmulas são ferramentas úteis para a Engenharia, mas são um veneno para a educação, porque se podem transformar num substituto do pensamento».*

Até certo ponto, há uma contradição aparente entre estas duas asserções porque não é possível raciocinar com números, sem tomar para base as fórmulas em que eles têm de intervir; e por isso, talvez o grande problema da Engenharia de hoje consista precisamente em procurar definir com exactidão as condições reais de as fazer conciliar.

É fora de dúvida que a primeira — que é, na sua essência, mais uma definição do que uma directiva — tem de ser considerada como absolutamente indiscutível; e por consequência, todo o problema se reduz a saber a partir de que ponto as fórmulas começam a ser de facto, «um veneno para a educação».

Ainda há pouco tempo, o Dr. George E. Holbrook director da pesquiza da «Du Pont», ao receber o «Professional Progress Award», conferido pela «AIChE» (2), afirmou a propósito da evolução da Técnica actual (3):

*«Quando nos desviamos do simples e do directo, tendemos a tornarmo-nos escravos das técnicas em vez de senhores da razão».*

A posição de «escravatura» em relação às «técnicas», identifica-se em absoluto com a posição em relação às «fórmulas» porque em qualquer dos casos, se trata da sujeição do espírito a fronteiras limitadas, dentro das quais os raciocínios se subordinam a

(1) «A Indústria e a Preparação Profissional», «Técnica», n.º 219, Fevereiro de 1952, pág. 265.
(2) «American Institute of Chemical Engineers».
(3) «Chemical Engineering», Fev. 1954, pág. 112.

princípios restritos e, em grande parte, de reduzida possibilidade de expansão. O problema é pois, intrìnsecamente mais profundo do que uma simples apreciação das vantagens ou inconvenientes que as fórmulas podem introduzir no conjunto da preparação profissional.

Em última análise, o ponto fundamental consiste em procurar qual a orientação mais adequada da preparação científica, de modo que o engenheiro não deixe de ser «senhor da razão» na complexidade crescente dos problemas científico-técnicos dos nossos tempos.

Mais adiante, diz o Dr. Holbrook:

*«A incapacidade de reduzir à forma mais simples, o conjunto sempre crescente dos conhecimentos de que deve resultar toda a evolução futura do standard de vida e da orientação da técnica, acaba por dar origem a confusão, a dissipação de esforços e a um ritmo mais lento do progresso geral».*

Esta opinião é particularmente significativa por ser expressa num país, como os Estados Unidos, cujo grau de especialização — e por consequência, de solidez da estrutura técnica [1] — permite de certo modo, relegar para segundo plano os problemas de educação geral. Mas é curioso notar também que, exactamente por essa razão, este aspecto, no que se refere à Engenharia Química, só agora começa a aparecer na literatura técnica norte americana, ao passo que entre nós, por exemplo, há já bastante tempo que o problema vem a ser posto nos mesmos termos e com uma objectividade ainda maior.

E compreende-se que seja assim, porque a um menor desenvolvimento no caminho da especialização corresponde necessàriamente uma maior amplitude de preparação geral com um sentido de aplicação directa, e por consequência, com uma exigência de maior cuidado na sua elaboração.

Quando, em tempos, fiz uma análise retrospectiva da orientação seguida na publicação dos artigos sobre operações unitárias [2], foquei a importância de distinguir, na preparação técnica, os *factores de formação* e os *factores de aplicação,* tendo esquematisado as conclusões da seguinte forma:

*«O dinamismo dos tempos actuais caracteriza-se por uma evolução constante nos processos, nos rendimentos e nas aplicações. Esta evolução tem uma determinada velocidade estatística que condiciona o progresso material do Mundo em cada instante e, por consequência, é evidente que os diferentes trabalhos que se realizam são obrigados a ter um certo ritmo, de modo a serem capazes de acompanhar a evolução geral.*

*«Esta conclusão, que faz realçar, mais uma vez, o valor intrínseco dos factores de formação, conduz ainda à imposição da necessidade de reduzir o tempo destinado à sua aprendizagem, conjugando-o convenientemente com o valor absoluto mais aconselhável a que devem obedecer. Sob o ponto de vista prático, tudo se resume em separar o «essencial» do «acessório», esquematisando os factores de formação nas suas directrizes basilares e abstraindo de todos os pormenores desnecessários os quais, na realidade, representam já uma certa tendência de descentralização; por outras palavras, há que efectuar a sua redução aos esquemas mais simples na generalidade, mas que representem sínteses racionais com o máximo valor de orientação.*

*«A elaboração dessas sínteses é sempre um trabalho demorado e por vezes difícil o qual, no entanto, se torna absolutamente necessário como condição «sine qua non» da satisfação simultânea aos imperativos de equilíbrio e de tempo. Só assim é possível obter um elevado rendimento de trabalho evitando, por um lado, o aumento de «entropia»*

(1) «A Indústria e a Preparação Profissional», Técnica», n.º 219, Fevereiro de 1952, pág. 265.

(2) «O Conceito de Equilíbrio na Preparação Científico-Técnica», «Técnica», n.º 201, Abril de 1950, pág. 999.

*resultante da falta de ordenação e, por outro lado, a «dissipação de calor» proveniente da lentidão das transformações».*

Encarada a quatro anos de distância, é possível que esta transcrição exija um aditamento que a faça conservar em absoluto a sua actualidade — é que essas sínteses não podem ser estáticas, mas têm de acompanhar sempre a evolução do progresso e adaptar-se em cada instante, às exigências da prática executiva. E é dentro da mesma linha de pensamento, que o artigo que cita as afirmações do Dr. Holbrook, acrescenta:

*«Alarmado pela complexidade crescente na ciência, nas finanças e na indústria, Holbrook faz notar que até aqui, o grande meio para lidar com essa complexidade, tem sido uma especialização cada vez maior. Holbrook sugere que se tente a simplificação, como um instrumento potencialmente poderoso mas até agora não experimentado».*

Em todo o caso, há que atribuir à simplificação o verdadeiro significado, afim de que a ideia não seja falseada no seu espírito.

* * *

Quando se fala em simplificação, ocorre-me sempre o exemplo clássico da interpretação por meio de conceitos simples, dos fundamentos da Teoria da Relatividade, porque dessa simplificação aparente, apenas resultam em geral, ideias confusas, pouco precisas e sem interesse de formação. Não quere isto dizer que não se consiga desse modo, obrigar a uma certa meditação sobre leis que não são intuitivas, mas o que interessa fundamentalmente, é que as noções complexas não são redutíveis a noções simples, nem mesmo à custa de explicações extensas e mais ou menos fantasiadas. Aliás, a postulação de novas leis só tem significado à medida que as leis primitivas começam a ser postas em dúvida ao ampliarem-se os seus domínios de aplicação; e por isso, uma lei complexa não é mais do que a generalização de uma lei menos complexa, na qual se estabeleceram factores de correcção sobre certas relações fundamentais. E é assim que se consegue manter, dentro de certos limites, a simplicidade formal indispensável, no estabelecimento de «fórmulas» de aplicação directa aos problemas a resolver.

Mas não se pode esquecer que, quando as noções se vão tornando menos simples, a sua simplicidade formal só consegue apreender-se à custa de uma preparação científica adequada e por isso, a «simplificação» só é possível em última análise, à custa da «preparação». E é lógico que seja assim, porque só deste modo a «simplificação» se pode tornar sinónima de «sintese» e esta constitui na realidade, a verdadeira simplificação formativa.

Se assim não for, acontece que o «número» que surge da aplicação de um dado conceito a um problema concreto, não resulta de um conhecimento integral do fenómeno em que intervém e por isso, as fórmulas que se utilizam podem começar a constituir efectivamente um «veneno para a educação», porque se tornam um instrumento mecânico do qual não se aproveita a totalidade dos recursos em potencial.

Por outro lado, quando se estendem estes princípios à Engenharia, não se pode abstrair do carácter executivo que constitui a sua própria essência, pelo que à «simplificação na preparação» se tem de acrescentar a «simplificação na execução», como garantia de funcionamento da estrutura técnica no seu conjunto. E esta última só se atinge por meio da «experiência» que permite simplificar os processos de cálculo, de acordo com as condições específicas de cada caso particular.

No artigo em que foram definidas as características das articulações simples e complexas ([1]), concluiu-se que os resultados da organização técnica só poderiam «ser atingidos

---

([1]) «A Indústria e a Preparação Profissional», «Técnica», n.º 219, Fevereiro de 1952, pág. 263.

completamente se fossem alicerçados na *experiência* colhida ao longo das sucessivas posições hierárquicas ocupadas, de modo a não perder em nenhum instante, o contacto com a realidade física dos problemas estudados. Simplesmente, esse contacto seria cada vez menos directo, e no limite, não poderia ser atingido a não ser por um mecanismo de pura radiação».

A experiência aparece assim como uma condição complementar da formação profissional sem a qual ela fica necessàriamente incompleta e possìvelmente deformada, porque, na realidade, não basta saber raciocinar com números, mesmo que eles sejam o produto de uma formação teórica sólida; é necessário também que esses números se ajustem às condições da prática, criando insensìvelmente um sentimento de confiança nos resultados dos cálculos de aplicação.

Mas é evidente que a experiência tem um significado variável ao longo da hierarquia técnica, desde a verificação directa no caso das articulações simples, em que há equilíbrio entre a teoria e a prática, até a uma referenciação mais ou menos indirecta, mas em que se condensem os ensinamentos colhidos, na orientação traçada ao nível de cada articulação. E é deste modo que a experiência permite conhecer de perto, as condições de trabalho nas várias articulações, contribuindo assim para a formação directiva, que tem de acompanhar a interferência técnica das articulações mais complexas.

Em todo o caso, o valor correctivo da experiência não deve ser considerado como apriorístico, a não ser em trabalhos repetidos cujos resultados são imediatamente comparáveis entre si. O progresso da Engenharia reside na audácia das soluções novas, com o maior número possível de graus de liberdade, nas quais a experiência intervém apenas como elemento de apreciação equilibrada, nos resultados finais. E quando se passa ao campo da investigação aplicada, são já só as criações do espírito, completadas por uma experimentação sistemática e conclusiva, que constituem o processo normal, no domínio das realizações.

O carácter evolutivo da Engenharia moderna reduziu aparentemente o valor da experiência na formação profissional, porque reforçou a necessidade de intensificar a preparação teórica. Mas reduziu-o apenas em valor relativo, porque o valor absoluto não pode deixar de se manter, sob pena de tornar frágeis as articulações da estrutura técnica e fazer perigar, por consequência, a segurança do seu conjunto.

De qualquer modo porém, não se pode perder de vista que a experiência se vai tornando cada vez mais dependente dos conhecimentos teóricos, desaparecendo o seu significado quando isoladamente. Aliás, o progresso baseado apenas na experiência, é necessàriamente lento e não se ajusta ao ritmo forçado da evolução actual. Por outro lado ainda, as condições de produção, de riqueza das matérias-primas e de exploração industrial variam de tal maneira através dos anos, que a experiência se vai desactualizando ràpidamente, se não conservar um contacto contínuo com os problemas em que tem de intervir.

A Engenharia de hoje está cada vez mais submetida à preparação teórica, que tem de se reflectir poderosamente nas especializações escolhidas e em particular, na «simplificação» ou «síntese» dos conhecimentos fundamentais. E apesar disso, a experiência não pode deixar de a acompanhar em todos os níveis, no sentido de controlar os cálculos, de corrigir as constantes e de fornecer os dados de carácter experimental.

São estas as condições impostas pela evolução natural da Técnica, às quais não é possível fugir. Pelo contrário, há que encará-las objectivamente, com o sentimento de que só com confiança nos métodos e nos resultados, se pode contribuir eficientemente para o progresso da Técnica e como consequência imediata, para a valorização profissional.

C. D. 541.123.3

# Contribution à l'étude des systèmes ternaires de démixtion en milieu aquo-organique. Les systèmes $CO_3K_2$, $H_2O$, solvant organique*

PAR PIERRE A. LAURENT et J. P. ANTUNES GOMES

(Laboratoire de Chimie Organique de l'Institut Supérieur Technique de Lisbonne)

(Manuscrit reçu le 22-3-1954)

**Résumé :**

*Les isothermes de démixtion des systèmes $CO_3K_2$ — $H_2O$ — solvant organique ont été déterminés à 15° pour les différents solvants suivants :*

*alcool n-propylique, alcool tetra-hydro-furfurylique, pyrrolidine, pyridine, tetra-hydro-furanne, dioxanne, et 3-methoxy-butanol.*

*Il a été établi une transformation linéaire de ces isothermes. Le coefficient angulaire est indépendant du solvant organique. Il a pour valeur moyenne 2,627 à 15°. Il varie en fonction de la température.*

**Resumo :**

*As isotérmicas que separam as zonas homogénea e heterogénea de sistemas contendo $CO_3K_2$, $H_2O$ e um solvente orgânico, foram determinadas a 15° para os seguintes solventes :*

*álcool propílico normal, álcool tetra-hidro-furfurílico, pirrolidina, piridina, tetra-hidro-furano, dioxano e 3-metóxi-butanol.*

*Foi estabelecida uma transformação linear desta isotérmica, sendo o seu coeficiente angular independente do solvente orgânico e o seu valor médio 2,627 a 15°, variando em função da temperatura.*

Les études de systèmes ternaires de démixtion sont nombreuses. Elles ont souvent un intérêt industriel car elles donnent les éléments de base pour l'extraction par solvants. Les isothermes de démixtion sont de types très variés, mais on peut les classer en groupes assez bien définis. Ils présentent parfois des discontinuités dont les points singuliers correspondraient aux hydrates ou autres composés d'addition, mais ils sont souvent représentés par des courbes continues.

Un certain nombre d'essais ont été faits pour remplacer la représentation de la courbe de l'isotherme par une droite en utilisant des relations empiriques diverses avec des succés variés (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7). Plus récemment, l'un d'entre nous (8) (9) a pu mettre en évidence, pour des systèmes aquo-organiques, une relation simple quand

(*) Le présent travail a fait l'objet d'une communication à la «Sociedade Portuguesa de Quimica e Física» le 16 Mars 1954.

les systèmes satisfont un certain nombre de conditions physiques initiales (Fig. 1):

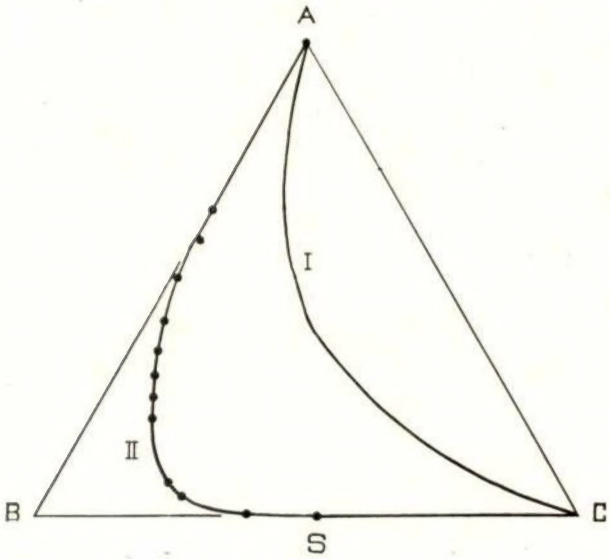



Fig. 1

*a*) Le composant A est entièrement miscible au composant B et insoluble dans le composant C;

*b*) Les composants C et B sont entièrement solubles (courbes du type I) ou partiellement solubles (courbes du type II);

*c*) La courbe de démixtion est pratiquement continue.

Dans ces conditions, une relation simple faisant intervenir les poids moléculaires des composants, permet de transformer l'isotherme en une droite avec une trés bonne approximation.

Les systèmes répondant au type II comportent souvent un sel minéral (C), de l'eau (B), et un solvant organique entièrement miscible à l'eau (A). Ils ont un gradient de température relativement important, le point S variant avec la solubilité du sel dans l'eau.

Les systèmes du type I comportent généralement un composant organique à la place du sel (C). Quand la miscibilité est totale, le gradient de température est relativement faible, en général.

Pour des systèmes du type II on a pu obtenir une transformation linéaire avec les résultats suivants:

A chaque groupe sel-eau-solvant organique correspond un coefficient angulaire.

Pour un même sel, le coefficient angulaire est sensiblement le même, donc ne dépend pas du solvant.

Ce coefficient angulaire sera défini plus loin, ainsi que le calcul simple qui permet cette transformation.

Pour les systèmes aquo-organiques du type I une représentation rectiligne est également possible (11) (12).

Une extension des résultats (8) (10) pour des isothermes du type II avait pu être obtenue à partir de données expérimentales d'autres auteurs pour différents solvents.

Il nous a paru intéressant de vérifier si la relation trouvée était applicable à des solvants plus variés et nous avons ainsi étudié à 15° les systèmes:

| | | |
|---|---|---|
| $CO_3K_2$ — eau — | alcool *n*-propylique | (tableau n.° 2) |
| | alcool treta-hydro-furfurylique | ( » » 3) |
| | pyridine | ( » » 4) |
| | pyrrolidine | ( » » 5) |
| | treta-hydro-furanne | ( » » 6) |
| | dioxanne | ( » » 1) |
| | 3-methoxy-butanol | ( » » 7) |

Pour chaque isotherme de démixtion les résultats en pourcentage (poids) sont donnés dans les différents tableaux correspondants. Un seul système est reproduit avec les chiffres intermédiaires du calcul de transformation linéaire au tableau n.° 1 (le système $CO_3K_2$ — $H_2O$ — dioxanne dont les points experimentaux sont reproduits sur la fig. 1, courbe II).

La courbe de démixtion du carbonate de potassium devrait présenter des points anguleux correspondant aux différents hydrates. Ils sont dans les cas considérés graphiquement inexistants et n'altèrent pas la représentation rectiligne.

## TABLEAU N.° 1

| % en poids | | | $y$ | $M_E$ | $M_S$ | | $x.10^3$ | | $z.10^3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $CO_3K_2$ | $H_2O$ | Dioxanne | $\frac{p_{CO_3K_2}}{138,2}$ | $\frac{p_{H_2O}}{18}$ | $\frac{p_{diox.}}{88}$ | $M_E + M_S$ | $\frac{M_S}{M_E + M_S}$ | $y_o - y$ | $\frac{x}{y_o - y}$ |
| 52,0 | 48,0 | 0,0 | 0,3770 | 2,67 | 0 | 2,670 | 0 | 0 | |
| 38,7 | 61,0 | 0,3 | 0,2800 | 3,39 | 0,0033 | 3,393 | 0,98 | 0,0970 | 10,1 |
| 24,8 | 71,2 | 4,0 | 0,1796 | 3,96 | 0,0464 | 4,006 | 1,16 | 0,1974 | 5,9 |
| 20,8 | 72,2 | 7,0 | 0,1500 | 4,01 | 0,0812 | 4,091 | 19,85 | 0,2264 | 87,7 |
| 11,1 | 68,4 | 20,5 | 0,0804 | 3,80 | 0,234 | 4,034 | 58,1 | 0,2966 | 196,0 |
| 9,1 | 65,6 | 25,3 | 0,0653 | 3,64 | 0,286 | 3,926 | 72,9 | 0,3117 | 234,0 |
| 7,0 | 63,3 | 29,7 | 0,0507 | 3,52 | 0,339 | 3,859 | 87,8 | 0,3263 | 269,0 |
| 4,9 | 60,1 | 35,0 | 0,0359 | 3,34 | 0,398 | 3,738 | 106,5 | 0,3411 | 313,0 |
| 3,1 | 55,2 | 41,2 | 0,0223 | 3,10 | 0,468 | 3,568 | 131,3 | 0,3547 | 370,0 |
| 1,3 | 48,5 | 50,2 | 0,0096 | 2,69 | 0,571 | 3,261 | 175 | 0,3674 | 476,0 |
| 0,2 | 35,3 | 64,5 | 0,0018 | 1,96 | 0,733 | 2,696 | 272 | 0,3752 | 726,0 |
| 0,0 | 0,0 | 100,0 | 0 | 0 | 1,136 | 1,136 | 1.000 | 0,3770 | 2.650,0 |

## TABLEAU N.° 2

| % en poids | | | $x.10^3$ | $z.10^3$ |
|---|---|---|---|---|
| $CO_3K_2$ | $H_2O$ | Álcool *n*-propylique | | |
| 52,0 | 48,0 | 0,0 | 0,0 | |
| 24,6 | 74,1 | 1,3 | 5,1 | 25,5 |
| 17,8 | 78,3 | 3,9 | 14,9 | 59,9 |
| 12,9 | 81,1 | 6,0 | 21,6 | 76,1 |
| 9,0 | 81,5 | 9,5 | 34,6 | 109,1 |
| 4,3 | 77,0 | 18,7 | 68,1 | 196,7 |
| 2,1 | 62,5 | 35,4 | 145,5 | 402,0 |
| 1,6 | 57,2 | 41,2 | 177,8 | 486,0 |
| 0,3 | 39,9 | 59,8 | 310,0 | 827,0 |
| 0,0 | 0,0 | 100,0 | 1.000,0 | 2.650,0 |

## TABLEAU N.° 3

| % en poids | | | $x.10^3$ | $z.10^3$ |
|---|---|---|---|---|
| $CO_2K_3$ | $H_2O$ | Álcool tetra-hydro-furfu-rylique | | |
| 52,0 | 48,0 | 0,0 | 0,0 | |
| 34,7 | 64,4 | 0,9 | 2,6 | 20,3 |
| 26,1 | 68,7 | 5,2 | 13,5 | 71,8 |
| 18,7 | 65,9 | 15,4 | 25,4 | 105,0 |
| 10,8 | 58,2 | 31,0 | 85,8 | 287,0 |
| 7,9 | 54,3 | 37,8 | 115,5 | 349,0 |
| 3,1 | 42,3 | 54,6 | 185,5 | 523,0 |
| 0,9 | 28,1 | 71,0 | 309,0 | 835,0 |
| 0,0 | 0,0 | 100,0 | 1.000,0 | 2.650,0 |

## TABLEAU N.° 4

| % en poids | | | $x.10^3$ | $z.10^3$ |
|---|---|---|---|---|
| $CO_3K_2$ | $H_2O$ | Pyridine | | |
| 52,0 | 48,0 | 0,0 | 0,0 | |
| 25,6 | 73,5 | 0,9 | 2,8 | 14,9 |
| 22,1 | 76,9 | 1,0 | 3,0 | 13,6 |
| 11,5 | 83,8 | 4,7 | 12,7 | 43,1 |
| 9,1 | 82,6 | 8,3 | 22,2 | 71,4 |
| 6,5 | 78,6 | 14,9 | 41,4 | 125,3 |
| 3,8 | 69,8 | 26,4 | 79,4 | 227,5 |
| 1,6 | 59,3 | 39,1 | 130,4 | 357,0 |
| 0,3 | 43,3 | 56,4 | 299,2 | 799,0 |
| 0,0 | 0,0 | 100,0 | 1.000,0 | 2.650,0 |

## TABLEAU N.° 5

| % en poids | | | $x.10^3$ | $z.10^3$ |
|---|---|---|---|---|
| $CO_3K_2$ | $H_2O$ | Pyrrolidine | | |
| 52,0 | 48,0 | 0,0 | 0,0 | |
| 27,3 | 71,5 | 1,2 | 4,5 | 24,8 |
| 13,8 | 74,9 | 11,3 | 36,9 | 133,5 |
| 10,7 | 72,9 | 16,4 | 53,6 | 179,0 |
| 4,8 | 66,4 | 28,8 | 99,0 | 289,5 |
| 2,1 | 58,9 | 39,0 | 143,5 | 397,0 |
| 1,8 | 55,1 | 43,1 | 165,3 | 454,0 |
| 0,7 | 49,3 | 50,0 | 204,5 | 550,0 |
| 0,3 | 41,4 | 58,3 | 263,5 | 703,0 |
| 0,0 | 0,0 | 100,0 | 1.000,0 | 2.650,0 |

TABLEAU N.° 6

| % en poids | | | x.10³ | z.10³ |
|---|---|---|---|---|
| $CO_3K_2$ | $H_2O$ | Tetra-hydro-furanne | | |
| 52,0 | 48,0 | 0,0 | 0,0 | |
| 27,1 | 71,4 | 1,5 | 5,4 | 29,7 |
| 22,5 | 75,0 | 2,5 | 8,5 | 39,5 |
| 14,6 | 79,2 | 6,2 | 19,1 | 73,1 |
| 11,5 | 78,8 | 9,7 | 29,6 | 101,0 |
| 5,2 | 71,8 | 23,0 | 74,3 | 219,0 |
| 2,1 | 56,4 | 41,5 | 155,5 | 429,0 |
| 1,8 | 55,9 | 42,3 | 159,1 | 437,0 |
| 0,6 | 42,7 | 56,7 | 297,5 | 798,0 |
| 0,0 | 0,0 | 100,0 | 1.000,0 | 2.650,0 |

TABLEAU N.° 7

| % en poids | | | x.10³ | z.10³ |
|---|---|---|---|---|
| $CO_3K_2$ | $H_2O$ | 3-Methoxy-Butanol | | |
| 52,0 | 48,0 | 0,0 | 0,0 | |
| 27,5 | 72,4 | 0,1 | 0,3 | 1,8 |
| 13,8 | 75,1 | 11,1 | 24,8 | 89,9 |
| 10,5 | 71,9 | 17,6 | 40,5 | 134,2 |
| 4,5 | 62,2 | 33,3 | 85,2 | 248,5 |
| 1,9 | 52,8 | 45,3 | 128,8 | 354,5 |
| 1,7 | 51,5 | 46,8 | 135,6 | 371,7 |
| 0,6 | 41,5 | 57,9 | 194,5 | 519,0 |
| 0,0 | 0,0 | 100,0 | 1.000,0 | 2.650,0 |

*Indications sur le calcul de transformation linéaire :*

## Notations

$M_S$ = nombre de molécules de solvant organique
$M_E$ = nombre de molécules d'eau
$M_A$ = nombre de molécules de sel
} dans 100 g de solution

$$x = \frac{M_S}{M_E + M_S} \qquad y = M_A = f(x)$$

L'hypothèse de départ consiste à assimiler la courbe y à un arc d'hyperbole équilatère, passant par les deux points certains suivants :

1) le point solvant organique pur

$$(y = 0,\ M_E = 0).$$

2) le point correspondant à la solubilité du composant minéral dans l'eau en absence de solvant organique

$$(y = y_0,\quad M_s = 0)$$

$y_0$ étant le nombre de molécules de composant minéral contenu dans 100 g de solution aqueuse saturée.

TABLEAU N.° 8

| Système | Température | a |
|---|---|---|
| $CO_3K_2$ — $H_2O$ — Alcool *n*-propylique | 15°C | 2,632 |
| » » Alcool tetra-hydro-fulfurylique | » | 2,610 |
| » » Pyridine | » | 2,634 |
| » » Pyrrolidine | » | 2,628 |
| » » Tetra-hydro-furanne | » | 2,631 |
| » » Dioxanne | » | 2,613 |
| » » 3-methoxy-butanol | » | 2,642 |
| Moyenne | | 2,627 |
| *$CO_3K_2$ — $H_2O$ — Alcool iso-propylique* | *20°* | *2,578* |
| » » *Alcool allylique* | » | *2,598* |
| » » *Acetone* | » | *2,588* |
| *Moyenne* | | *2,588* |
| *$CO_3K_2$ — $H_2O$ — Alcool ethylique* | *25°* | *2,54* |

La confirmation de cette hypothèse revient à vérifier (8) que la fonction

$$z = \frac{x}{y_o - y}$$

est une fonction linéaire de x donc

$$z = a\,x + b$$

Les coefficients *a* et *b* sont déterminés par ajustements basés sur la méthode des moindres carrés ou plus simplement par pondération des points expérimentaux (8).

Si on pose

$$K = 1 - a \,.\, y_o$$

(K est ici pratiquement égal à 0,01) on arrive facilement au résultat

$$\frac{M_S}{M_E} = K \left( \frac{M_{oA}}{M_A} - 1 \right)$$

en posant pour l'homogénéité de l'écriture

$$y_o = M_{oA} \quad \text{et} \quad y = M_A$$

Le tableau 8 donne les coefficients angulaires calculés pour les différents systèmes étudiés.

Les chiffres en italique sont relatifs aux coefficients angulaires calculés * à partir de données expérimentales d'autres auteurs (13) (14) (10). Tout en restant du même ordre de grandeur, ils forment un groupe distinct de celui tiré de nos mesures. Cette différence est aisée à interpréter: les températures d'expérience sont différentes, 15° pour nos mesures et 20° pour les autres.

Nous avons ajouté à titre d'exemple un coefficient calculé pour le système $CO_3K_2$ — $H_2O$ — alcool éthylique (15). Sa valeur est nettement différente et il n'entre pas dans les valeurs du groupe considéré.

Cela tient au fait que ce système ne satisfait pas aux conditions initiales requises: le carbonate est nettement soluble dans l'alcool éthylique. Il en résulte d'ailleurs aussi un ajustement qui n'est pas satisfaisant et la droite qui a servi au calcul de «*a*» est mal définie.

Ce résultat négatif confirme nos hypothèses.

Le système $CO_3K_2$ — $H_2O$ — alcool propargylique n'a pas pu être inclus utilement dans ce mémoire par suite de difficultés expérimentales inattendues.

La figure 2 donne les résultats graphiques des différentes transformations pour les mesures faites par nous à 15.°.

La figure 3 donne les résultats calculés à partir de mesures faites par d'autres auteurs à 20° (13) (14) sur des systèmes comportant des solvants organiques différents.

Dans chaque figure le point □ représente la valeur de z pour x = 1.

$$z_A = \frac{1}{M_{oA}}$$

## Conclusion

Il est tout à fait remarquable que pour une température donnée on obtienne un coefficient angulaire pratiquement indépendant de la nature du solvant organique, ce qui confirme les résultats antérieurs (8) (9). La variété des fonctions chimiques des différents solvants fait penser qu'il s'agit ici d'un phénomène physique, la nature des fonctions chimiques n'intervenant que très peu (si elle intervient).

Il ressort nettement que le coefficient angulaire est une fonction de la température.

Une étude en ce sens est actuellement en cours.

## Remerciements

Nous nous faisons un plaisir d'exprimer ici nos remerciements à différentes Maisons pour l'intérêt qu'elles ont manifesté à l'égard de ce travail et pour la fourniture gracieuse d'échantillons qui ont permis sa réalisation

* Une erreur d'interprétation de solubilité avait fait trouver pour ces chiffres une valeur erronnée (3.87) pour *a* (8). Elle a été corrigée (sous presse au Bulletin de la Société Chimique de France) (10). Les valeurs exactes sont données ci-dessus.

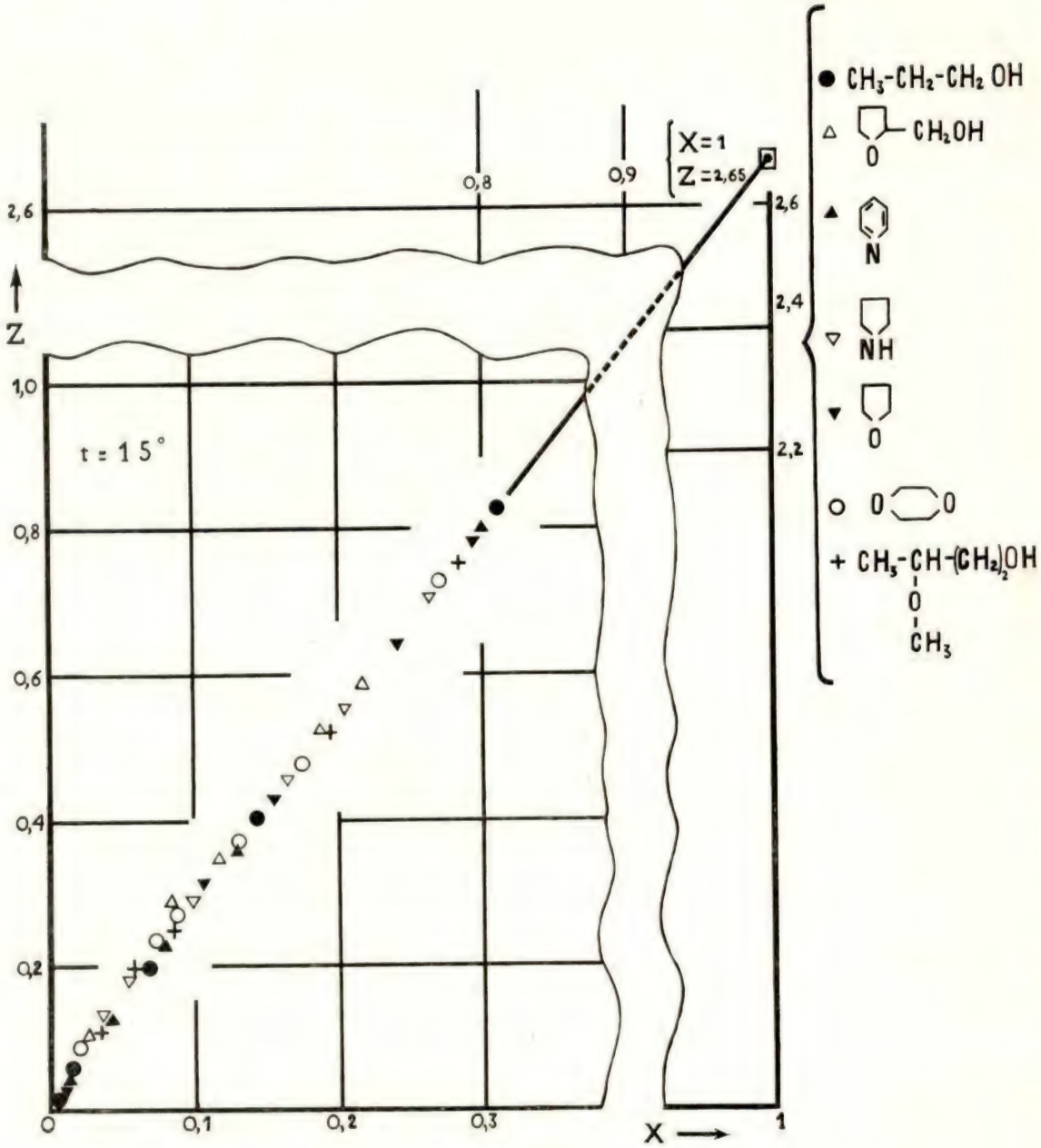



Fig. 2

rapide. En particulier la B. A. S. F. pour le tetra-hydro-furanne, la pyrrolidine et l'alcool propargylique; la Quacker Oats Co. pour l'alcool tetra-hydro-furfurylique; la Tennessee Eastman Co. pour le methoxy-3, butanol.

Nous avons également à coeur de remercier ici l'Instituto para Alta Cultura pour des facilités matérielles accordées à l'un d'entre nous (A. G.).

## Partie expérimentale

1) *Purification des produits*

*a*) Le carbonate de potassium pur pour analyse est recristallisé.

*b*) Les solvants sont dans chaque cas distillés plusieurs fois jusqu'à constance du point d'ébullition et vérification de quelques propriétés physiques (densité, indice de réfraction).

Pour certains solvants, une purification plus poussée a été faite (élimination des peroxydes pour le dioxanne, par exemple) et les points expérimentaux refaits avec ces solvants. La coincidence a été excellente.

2) *Préparation des solutions de carbonate de potassium*

On prépare des solutions de carbonate de concentration connue. Leur titre est contrôlé par un dosage volumétrique.

3) *Technique expérimentale*

Une quantité convenable de solution de carbonate est additionnée de solvant organique jusqu'à démixtion. Une agitation magnétique facilite cette appréciation.

4) *Température*

La température est définie à 2° près. Il n'a pas été pris de précaution particulières, la température du laboratoire étant remarquablement constante pendant tout le temps des expériences. Il a été vérifié que de faibles variations introduisaient des variations inférieures aux erreurs expérimentales.

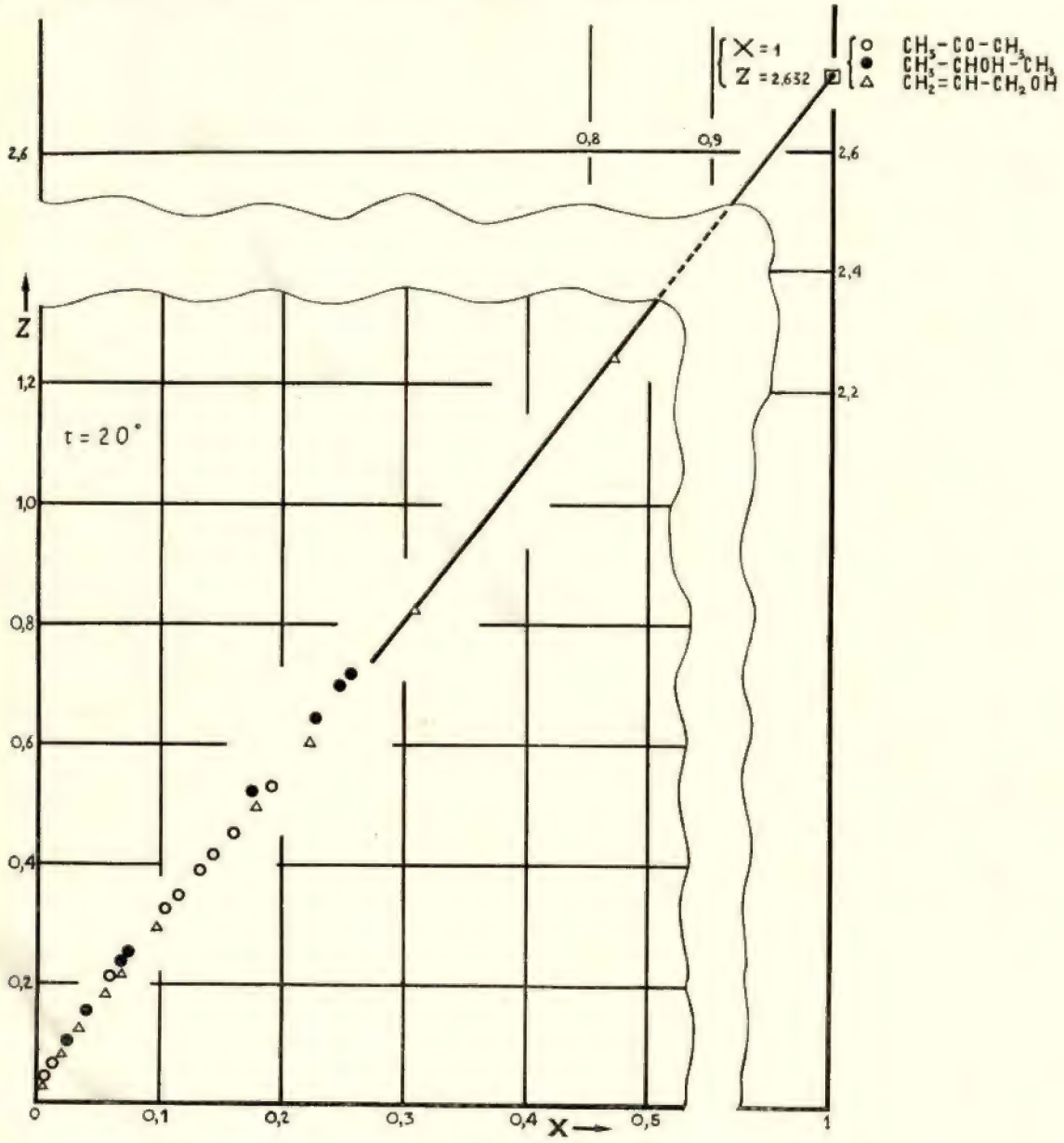



Fig. 3

## Bibliographie


(1) Tuchschmidt et Follenius, *Ber.*, **4**, 583, (1871).

(2) Pfeiffer, *Zeitschr. Phys. Chem.*, **9**, 44, (1892).

(3) J. M. Bell, *J. Phys. Chem.*, **9**, 531, (1905)

(4) C. F. Linnebarger, *Am. Chem. J.*, **14**, 380, (1892).

(5) G. Bodlaender, *Zeitschr. Phys. Chem.*, **7**, 309, (1891).

(6) W. D. Bankroft, *J. Phys. Chem.*, **1**, 34, et 760, (1895); *J. Phys. Chem.*, **3**, 217, (1899); *Phys. Review*, **3**, 21, (1895).

(7) W. D. Bonner, *J. Phys. Chem.*, **14**, 752, (1910).

(8) M. J. Duhamel et P. A. Laurent, *Bull. Soc. Chim.*, 160 (1953).

(9) M. J. Duhamel et P. A. Laurent, *C. R.*, **234**, 2069, (1952).

(10) Sous presse au *Bull. Soc. Chem.*

(11) P. A. Laurent et J. M. Nascimento, *Revista da Faculdade de Ciências de Lisboa*, **2** B, 173, (1953).

(12) P. A. Laurent et collaborateurs, à paraitre dans *Técnica (Lisboa)*.

(13) G. B. Frankforter et S. Temple, *J. Am. Chem. Soc.*, **37** II, 2697, (1915).

(14) G. B. Frankforter et L. Cohen, *J. Am. Chem. Soc.*, **36** I, 1103, (1914).

(15) G. B. Frankforter et F. C. Frary, *J. Phys. Chem.*, **17**, 402, (1913).

C. D. 621.314.263:621.395.63

# Conversores síncronos de frequência utilizados em sinalização telefónica

PELO ENG.º ELECT. MANUEL ABREU FARO
Assistente do I. S. T.

*Será objecto, do presente trabalho, a consideração de alguns aspectos técnicos da utilização de circuitos com bobinas de núcleo de ferro saturado como conversores de frequência.*

*Tomamos como base os resultados obtidos em dois trabalhos anteriores, publicados nesta revista nos números (200, 202, 203) e (218, 219, 220).*

*Vamo-nos ocupar, concretamente, da conversão de frequência f em f/3.*

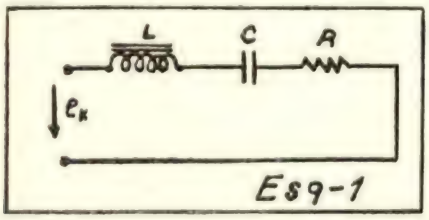
*Este tipo de conversores encontra, actualmente, larga aplicabilidade como «geradores de corrente de chamar» nas comunicações por telefones.*

*Procede-se, aí, à conversão das frequências 50-60 Hz nas 16 2/3 — 20 Hz, sendo este último domínio aquele que técnicamente mais convém para o fim em vista.*

*A fim de ilustrar as referidas considerações apresentamos os resultados dos ensaios a que procedemos com um conversor do tipo considerado.*

## 1 — Regimes permanentes nos circuitos com bobinas de núcleo de ferro saturado

O circuito representado no esquema **1** é o mais simples daqueles em que se pode observar a desmultiplicação de frequência.




Alimentado por uma tensão alternada sinusoidal:

$$e_K = E_K \cos \omega t$$

apresenta um regime permanente em que a corrente i, fluxo $\varphi$, etc. são funções periódicas de período $T = \frac{2\pi}{\omega}$.

Dentro dum intervalo $0 < E_K < E_{Km}$ podemos dizer que qualquer dessas grandezas é uma função contínua de $E_K$.

A não linearidade da bobina evidencia-se pelo aparecimento de harmónicas.

Contudo, nas suas linhas gerais, o regime considerado é fìsicamente semelhante ao do circuito linear em que o coeficiente de inducção própria da bobina é L = constante.

Analisado no intervalo considerado, este regime é estável; não se observando para as flutuações inerentes a qualquer sistema físico ou para as perturbações transitórias de estabelecimento, uma vez que o condensador se encontre inicialmente descarregado, outro regime se não este.

Estabelecendo um curto-circuito instantâneo aos terminais da bobina, o circuito é sede dum regime transitório após o qual se observam, por vezes, oscilações com frequência sub-múltipla da frequência "f" da tensão de alimentação.

Aos terminais do condensador aparece uma tensão periódica de frequência $f/_n$, utilizando-a realizamos um conversor síncrono de frequências.

Como veremos, essa deve ser exactamente a tensão que devemos utilizar por ser a que mais se aproxima da forma sinusoidal.

* * *

A existência dum regime permanente da sub-harmónica $f/_n$ implica um processo energético que permita o fornecimento da energia necessária à sua manutenção mediante um gerador de tensão alternada de frequência "f".

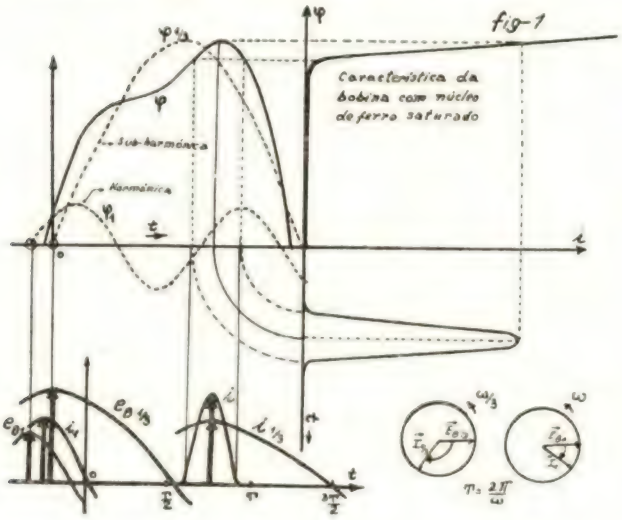
O que só é possivel se no circuito existir um elemento que para a frequência $f/_n$ apresente uma desfasagem superior a 90° entre as componentes $(1/_n)$ da corrente e tensão aos seus terminais.

Dentro dos princípios da linearização esse elemento será equivalente para a frequência $f/_n$ a uma resistência negativa $R_{1/n}$ em série ou paralelo com um elemento reactivo $X_{1/n}$.

* * *

O elemento que desempenha esta função é o elemento não linear, neste caso a bobina.

Na figura 1 apresentamos uma construção em que se evidencia o facto.




Consideremos o caso da desmultiplicação $1/_3$.

O fluxo, mostra-o a experiência, é essencialmente constituído por duas grandezas sinusoidais de frequência f e $f/_3$.

Vamos supô-lo da forma:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_{1/3} = x_1 \text{ sen } (\omega t + \Psi_1) + \\ + x_3 \text{ sen } \left(\frac{\omega}{3} t + \Psi_3\right)$$

Na origem dos tempos a harmónica está em avanço em relação à sub-harmónica

$$(\Psi_3 = 0 \qquad 0 < \Psi_1 < 90^\circ)$$

Supomos que se trata duma bobina com o núcleo fortemente saturado de tal modo que só contribuem para a corrente os extremos do fluxo.

A corrente apresenta-se, pois, constituída por impulsos alternados.

A análise da corrente, leva-nos à conclusão que é constituída, àparte outras harmónicas por duas sinusoides $i_{1/3}$ e $i_1$ com os seus máximos centrados, sensìvelmente, no eixo do impulso.

Relativamente a uma outra escala de tempos, representamos as posições de $(i_1)$ $(i_{1/3})$ e das tensões $(e_{B1})$ e $(e_{B\,1/3})$

$$e_{B1} = \frac{d\varphi_1}{dt} \qquad e_{B\,1/3} = \frac{d\varphi_{1/3}}{dt}$$

Podemos traçar o diagrama vectorial das amplitudes complexas

$$(\vec{E}_{B1}, \vec{I}_1)\,\omega \qquad (\vec{E}_{B\,1/3}, \vec{I}_{1/3})\,\omega/_3$$

Observando-se que:

$$(\vec{E}_{B\,1/3}, \vec{I}_{1/3}) > 90^\circ\,\omega/_3$$

e que

$$(\vec{E}_{B1}, \vec{I}_1) < 90^\circ\,\omega$$

* * *

Conclui-se portanto que para a forma de fluxo considerada há uma possibilidade energética de manutenção dum regime permanente da sub-harmónica $^1/_3$.

Análise semelhante se pode aplicar a outras sub-harmónicas e daqui concluir a possibilidade da existência de outros regimes permanentes.

* * *

Averiguada essa possibilidade torna-se lícito investigar para essa forma, condições mais bem definidas de existência efectiva dum regime permanente estável.

Introduzida a forma admitida

$$\varphi = x_1 \text{ sen } (\omega t + \Psi_1) + x_3 \text{ sen } \left(\frac{\omega t}{3} + \Psi_3\right)$$

na equação diferencial que rege o comportamento do circuito obtemos equações que nos permitem determinar $x_1$ $x_3$ $\Psi_1$ $\Psi_3$ ou seja o integral particular correspondente ao regime permanente.

* * *

A estas determinações deve seguir-se o estudo da estabilidade das soluções encontradas, o que se fará por métodos variacionais.

* * *

Estudada a estabilidade dos regimes permanentes da sub-harmónica $^1/_3$ concluimos que só parte do domínio das soluções encontradas, corresponde a soluções estáveis:

Para o domínio de estabilidade encontramos

$$x_3 > x_{03}$$
$$x_{03} > 0$$

A solução correspondente a $x_3 = 0$ que degeneraria no regime normal representa um estado estável do regime normal que é vizinho de estados instáveis do regime da sub-harmónica.

* * *

A estabilidade do regime normal representa portanto a impossibilidade do aparecimento expontâneo de sub-harmónicas, uma vez que se admita que o circuito não é sujeito a grandes perturbações.

Efectivamente a experiência demonstra que expontaneamente não se pode obter no circuito considerado nenhuma sub-harmónica em regime permanente.

* * *

Resumimos assim a traços largos a natureza de determinados regimes permanentes observáveis no circuito considerado.

## 2 — Aspectos técnicos da obtenção de sub-harmónicas em regime permanente.

Das considerações feitas resulta, imediatamente, que o aproveitamento técnico destes circuitos como conversores de frequência encontra uma dificuldade logo de início — o estabelecimento do regime permanente da sub-harmónica considerada e isto deve ser encarado sob dois aspectos:

1) A sub-harmónica não se manifesta expontâneamente, sendo necessário submeter o circuito a um regime transitório violento como por exemplo o curto-circuito instantâneo da bobina.
2) Existindo diversos tipos de sub-harmónicas é necessário que se obtenha aquela que se pretende e não outra. No laboratório, pela operação citada, obtivemos para a mesma tensão $E_K$ a sub-harmónica $^1/_2$ e a sub-harmónica $^1/_3$ embora esta com muito mais frequência. Além de que a sub-harmónica $^1/_2$ só existe num domínio muito limitado da amplitude $E_K$.

* * *

Mas, a possibilidade energética de manutenção da sub-harmónica explica-se pela coexistência no elemento não linear de duas oscilações f e f/n.

Deste modo, é a sub-harmónica que cria a possibilidade da sua própria existência.

Este facto leva-nos a suspeitar que para o estabelecimento em regime permanente duma dada sub-harmónica deve existir prèviamente uma oscilação livre de frequência vizinha de f/n que tente, digamos assim, condições próprias de existência.

Se a sobreposição da oscilação livre com o regime forçado normal reproduzir num dado instante um estado próximo dum estado de equilíbrio do regime permanente a oscilação livre tenderá a ser sincronizada dando-se assim o estabelecimento em regime permanente da sub-harmónica.

* * *

Vejamos como se explica a técnica, que se usou, de curto-circuitar instantâneamente a bobina. Ao estabelecer-se um curto circuito instantâneo na bobina aparece aos terminais do condensador uma tensão elevada; se no instante em que se interrompe o

curto circuito o condensador tiver uma carga suficiente o circuito será sede dum regime livre oscilante intenso.

Trata-se dum regime oscilante amortecido cuja frequência variará com a amplitude das oscilações dado que a bobina é de núcleo de ferro saturado.

A análise desse regime mostra que a frequência decresce a partir do valor inicial.

Se a frequência inicial for maior que f/n há a possibilidade dessas oscilações apresentarem uma frequência $\simeq f/n$.

É nesse instante que aparece a possibilidade do estabelecimento do regime pretendido.

* * *

Como se vê o método é falível e depende da carga que o condensador tem no instante em que se interrompe o curto circuito, além de que não é selectivo pois podem estabelecer-se diversas sub-harmónicas.

* * *

Devemos notar que para uma mesma carga inicial do condensador há um factor que intervem ainda e que é impossível de controlar é a fase da tensão de alimentação. Consideremos a expressão do fluxo para a desmultiplicação $^1/_3$

$$\varphi = x_1 \operatorname{sen}(\omega t + \Psi_1) + x_3 \operatorname{sen} \frac{\omega}{3} t + \Psi_3$$

Só é possível a existência de regimes permanentes se a harmónica estiver na origem dos tempos em avanço em relação à sub-harmónica.

Portanto é necessário que, quando a frequência passa por $\simeq f/_3$ exista uma diferença de fase conveniente entre $\varphi_1$ $\varphi^1/_3$.

* * *

De tudo o que se disse concluimos que o circuito considerado não é tècnicamente utilizável.

Haverá conveniência que logo de início se estabeleça uma oscilação de frequência próxima de f/n e que mantenha a sua frequência na vizinhança deste valor.

Deste modo, o circuito apresentará sempre uma oscilação com possibilidade de ser sincronizada bastando que a harmónica apresente em determinado instante uma fase conveniente.

Aumenta-se deste modo a facilidade de arranque.

Isto consegue-se se fizermos intervir no circuito oscilante além do elemento não linear uma bobina pouco saturada.

A influência desta última será a de diminuir o grau de variação da frequência da oscilação livre, mantendo-se vizinha de f/n.

* * *

Outra necessidade será a de se poder contar com uma determinada carga inicial do condensador.

* * *

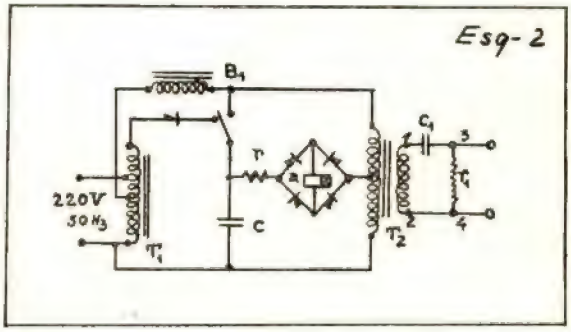
Ficará em suspenso o controle da fase da harmónica facto que perde importância se o regime transitório mantiver durante um intervalo de tempo grande em relação ao período T da harmónica uma oscilação de amplitude suficiente e frequência próxima de f/n.

* * *

Apresentamos em seguida um tipo de conversor que atende a estes factos e que apresenta consequentemente grande facilidade de estabelecimento do regime da sub-harmónica 1/3 [osc — 1 a].

## 3 — Conversor síncrono de frequências

Apresentamos no esquema **2** o esquema prático dum conversor síncrono de frequências $f \rightarrow f/3$.




Este tipo de conversor é conhecido pelo nome de «Syncycle» e é uma patente e realização das:

Telephone Manufacturing Co. LTD e da Automatic Telephone e Electric Co. LTD.

* * *

Inicialmente o condensador C encontra-se ligado por intermédio dum rectificador ao ponto de tensão mais elevada dum auto--transformador.

Quando se aplica a tensão do sector o condensador carrega-se aparecendo aos seus terminais uma tensão com uma componente contínua.

O automático "a" é então percorrido pela corrente suficiente para entrar em acção ligando o condensador sobre o primário dum transformador. $T_2$ (Bobina pouco saturada).

Devido a carga do condensador estabelece-se uma oscilação de frequência próxima de f/3 [osc — 1 e 1 a].

Uma vez que o núcleo de $T_2$ não está muito saturado essa oscilação é quase sinusoidal e mantém a frequência sensìvelmente constante.

A bobina $B_1$ que é o elemento não linear--fundamental apresenta pois aos seus terminais a soma da tensão correspondente à tensão de alimentação com a tensão da oscilação livre.

Uma vez que se estabeleça o regime permanente da sub-harmónica, aparece aos terminais do condensador e consequentemente aos terminais do primário de $T_2$ uma tensão elevada metade da qual é suficiente para manter o automático activo mediante um circuito de rectificação em ponte de Graetz.

Se a tentativa resultar infrutífera como a reactância do condensador é para a frequência f pequena relativamente à de $B_1$, a tensão aos terminais de C é muito pequena e o automático deixa de estar activo voltando-se à posição inicial. De novo o condensador se carrega e o processo repete-se até se estabelecer o regime da sub-harmónica.

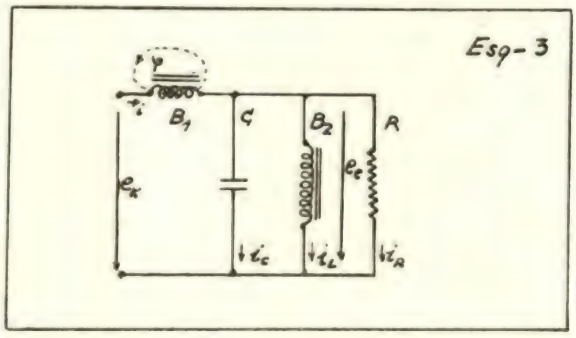
Em geral basta uma a duas tentivas para o regime se estabelecer [osc — 1 a].

Este circuito apresenta pois um método de arranque mais conveniente que o circuito série obtendo-se para o condensador sempre a mesma carga inicial.

Existem outros tipos de conversores semelhantes como seja o conhecido pelo nome de Sub-Cycle patente da Loraine Products. Corporation.

## 4 — Teoria do conversor síncrono de frequências

Apresentamos (Esq. — 3) o esquema básico do conversor de frequências em estudo.




Para o estabelecimento da teoria que se segue admitimos as seguintes hipóteses:

$B_1$ — Bobina de núcleo de ferro saturado

$\varphi$ — Fluxo total ligado com a bobina $B_1$

Característica de $B_1$ $i = a\varphi + b\varphi^3$

$B_2$ — Bobina de núcleo de ferro pouco saturado

Tomamos $B_2$ como linear atribuindo-lhe um coeficiente de inducção própria $L$

Desprezamos as perdas óhmicas em $B_1$ e $B_2$

Desprezamos as perdas devidas à conductividade do dieléctrico de $C$

Desprezamos as perdas no ferro em $B_1$ e $B_2$ e as perdas por histerese no dieléctrico de $C$.

Admitimos que não existe ligação magnética entre $B_1$ $B_2$

Consideraremos os fenómenos como quase estacionários

Usaremos como unidades, as do sistema electromagnético prático de Maxwell

* * *

Com estas restricções procuramos reduzir o estudo aos seus aspectos essenciais.

É nosso propósito, na teoria que se segue, a deteminação de «$\varphi$» no regime permanente de auto-oscilação da sub-harmónica $^1/_3$.

Tomaremos apenas em consideração oscilações de frequência $f$ (harmónica) e f/3 (sub-harmónica).

Do esquema considerado resultam as equações:

$$(1)\quad i = a\varphi + b\varphi^3$$

$$(2)\quad i = i_L + i_C + i_R$$

$$(3)\quad e_k = e_{BI} + e_C$$

$$(4)\quad e_{BI} = \frac{d\varphi}{dt}$$

$$(5)\quad i_L = \frac{1}{L}\int e_C\,dt \qquad i_R = \frac{e_C}{R} \qquad i_C = \frac{C\,de_C}{dt}$$

a partir das quais se obtém a equação:

$$(6)\quad \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{1}{CR}\frac{d\varphi}{dt} + \frac{1}{C}\left(a + \frac{1}{L}\right)\varphi + \frac{b}{C}\varphi^3 = \frac{de_k}{dt} + \frac{1}{CR}e_k + \frac{1}{LC}\int e_k\,dt$$

que se pode simplificar mediante as seguinnotações:

$$(6a)\quad \begin{aligned} &\frac{de_k}{dt} + \frac{1}{CR}e_k + \frac{1}{LC}\int e_k\,dt = \frac{de^*}{dt} \\ &e^* = E^*\cos\omega t \\ &\omega t = u \\ &\frac{E^*}{\omega} = \lambda \\ &\frac{1}{\omega CR} = \varepsilon \\ &\frac{1}{\omega^2 C}\left(a + \frac{1}{L}\right) = \alpha \\ &\frac{1}{\omega^2 C}\,b = \beta \end{aligned}$$

Convertendo-se em:

$$(7)\quad \frac{d^2\varphi}{du^2} + \varepsilon\frac{d\varphi}{du} + \alpha\varphi + \beta\varphi^3 = -\lambda\,\text{sen}\,u$$

admitindo para $\varphi$ a forma:

$$(8)\quad \varphi = x_1\,\text{sen}\,(u + \Psi_1) + x_3\,\text{sen}\left(\frac{u}{3} + \Psi_3\right)$$

resultará para

$$\alpha\varphi + \beta\varphi^3 = S_1\,\text{sen}\,(u + \Psi_1) + C_1\cos(u + \Psi_1) + S_3\,\text{sen}\left(\frac{u}{3} + \Psi_3\right) + C_3\cos\left(\frac{u}{3} + \Psi_3\right) \quad (9)$$

em que:

$$S_1 = \alpha x_1 + \beta\left[\frac{3}{4}(x_1^3 + 2x_3^2 x_1) - \frac{1}{4}x_3^3\cos\Psi\right]$$

$$C_1 = -\frac{\beta}{4}x_3^3\,\text{sen}\,\Psi$$

$$S_3 = \alpha x_3 + \beta\left[\frac{3}{4}(x_3^3 + 2x_1^2 x_3) - \frac{3}{4}x_3^2 x_1\cos\Psi\right] \quad (10)$$

$$C_3 = \frac{3\beta}{4}x_3^2 x_1\,\text{sen}\,\Psi$$

$$\Psi = 3\Psi_3 - \Psi_1$$

atendendo que:

$$\text{sen}\,u = \cos\Psi_1\,\text{sen}\,(u + \Psi_1) - \text{sen}\,\Psi_1\cos(u + \Psi_1) \quad (11)$$

Resultará da substituição de (8) (9) (10) (11) em (7)

$$-x_1 + S_1 = -\lambda\cos\Psi_1 \quad (12\,a)$$

$$\varepsilon x_1 + C_1 = \lambda\,\text{sen}\,\Psi_1 \quad (12\,b)$$

$$-\frac{x_3}{9} + S_3 = 0 \quad (12\,c)$$

$$\frac{\varepsilon}{3}x_3 + C_3 = 0 \quad (12\,d)$$

Equações que nos permitem determinar: $x_1$ $x_3$ $\Psi_1$ $\Psi_3$ uma vez conhecido $\lambda = \frac{E^*}{\omega}$ o qual por sua vez se determina de $E_K$ (6 a).

O problema da determinação de «$\varphi$» está deste modo resolvido, interessando, contudo, estabelecer algumas relações importantes e analisar a estabilidade da oscilação (f/3).

## 5. Relações entre a harmónica e a sub-harmónica

Vamos agora estabelecer algumas relações importantes entre $(x_1)(x_3)$ e $\Psi = 3\Psi_3 - \Psi_1$.

As equações (12 c) (12 d) podem escrever-se:

$$-\frac{x_3}{9} + \alpha x_3 + \beta\left[{}^3/_4(x_3^3 + 2x_1^2 x^3) - {}^3/_4 x_3^2 x_1\cos\Psi\right] = 0 \quad (13\,c)$$

$$\frac{\varepsilon}{3}x_3 + \frac{3\beta}{4}x_3^2 x_1\,\text{sen}\,\Psi = 0 \quad (13\,d)$$

Admitindo

$$x_3 \neq 0 \qquad x_1,\ x_3 > 0$$

Fazendo:

$$x_3^2 = y_3 \quad \frac{4}{3\beta} \left(\frac{1}{9} - \alpha\right)$$
$$x_1^2 = y_1 \quad \frac{4}{3\beta} \left(\frac{1}{9} - \alpha\right) \tag{14}$$

(13 c) (13 d) tomarão a forma:

$$(y_3 + 2\,y_1) - 1 = \sqrt{y_3\, y_1}\ \cos \psi \tag{15 c}$$

$$-\,k = \sqrt{y_3\, y_1}\ \text{sen}\ \psi \tag{15 d}$$

Em que

$$k = \frac{\varepsilon}{3}\ \frac{1}{\frac{1}{9} - \alpha} \tag{16}$$

Quadrando e somando obtemos:

$$4\,y_1^2 + 3\,y_1\,y_3 + y_3^2 - 4\,y_1 - 2\,y_3 + 1 + k^2 = 0 \tag{17}$$

A equação (17) representa uma família de elipses reais e homotéticas relativamente ao centro ($y_1 = {}^2/_7$ $y_3 = {}^4/_7$) desde que:

$$k \leq \frac{1}{\sqrt{7}}$$

## 6 — Estudo da estabilidade

Considerações semelhantes às que fizemos, a quando do estudo da estabilidade do circuito série (Técnica, n.os 218, 219 e 220) levar-nos-iam ao estabelecimento das equações:

$$\frac{dx_3}{du} = \Phi\,(x_3,\ \Psi_3)$$
$$\frac{d\psi_3}{du} = \Psi\,(x_3,\ \Psi_3) \tag{18}$$

Que nos permitem o estudo da estabilidade da oscilação sub-harmónica f/3.

Em que

$$\Phi\,(x_3,\ \psi_3) = -\,{}^3/_2 \left(\frac{\varepsilon}{3}\,x_3 + C_3\right)$$
$$\Psi\,(x_3,\ \psi_3) = -\,{}^3/_2 \left[\frac{1}{x_3} \cdot \left(\frac{x_3}{9} - S_3\right)\right] \tag{19}$$

a que corresponde o sistema variacional

$$\frac{d\rho}{du} = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x_3}\right)_0 \rho + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \Psi_3}\right)_0 \theta$$
$$\frac{d\theta}{du} = \left(\frac{\partial \Psi}{\partial x_3}\right)_0 \rho + \left(\frac{\partial \Psi}{\partial \Psi_3}\right)_0 \theta \tag{20}$$

Em que

$$\rho = x_3 - x_{03}$$
$$\theta = \Psi_3 - \Psi_{03} \tag{21}$$

sendo ($x_{03}$) ($\Psi_{03}$) as soluções constantes correspondentes ao regime permanente para as quais:

$$\Phi\,(x_{03},\ \Psi_{03}) = 0 \qquad \Psi\,(x_{03},\ \Psi_{03}) = 0$$

Em que:

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x_3}\right)_0 = {}^3/_2\ [\varepsilon/3]$$
$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial \Psi_3}\right)_0 = {}^3/_2\ [3\,x_3\,({}^1/_9 - W)]$$
$$\left(\frac{\partial \Psi}{\partial x_3}\right)_0 = {}^3/_2 \left[\frac{1}{x_3}\left(\frac{1}{9} - W + V\right)\right] \tag{22}$$
$$\left(\frac{\partial \Psi}{\partial \Psi_3}\right)_0 = {}^3/_2\,[-\,\varepsilon]$$

$$W = \alpha + \frac{3\,\beta}{4}\,(x_3^2 + 2\,x_1^2)$$
$$V = \frac{6\,\beta}{4}\,x_3^2 \tag{23}$$

A equação característica do sistema é:

$$\left(\frac{\partial \Phi}{d\,x_3} - r\right) \left(\frac{\partial \Psi}{\partial \Psi_3} - r\right) - \frac{\partial \Phi}{\partial \Psi_3}\ \frac{\partial \Psi}{\partial x_3} = 0$$

As soluções são estáveis se:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x_3} + \frac{\partial \Psi}{\partial \Psi_3} < 0 \tag{24 a}$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x_3}\ \frac{\partial \Psi}{\partial \Psi_3} - \frac{\partial \Psi}{\partial \Psi_3}\ \frac{\partial \Psi}{\partial x_3} > 0 \tag{24 b}$$

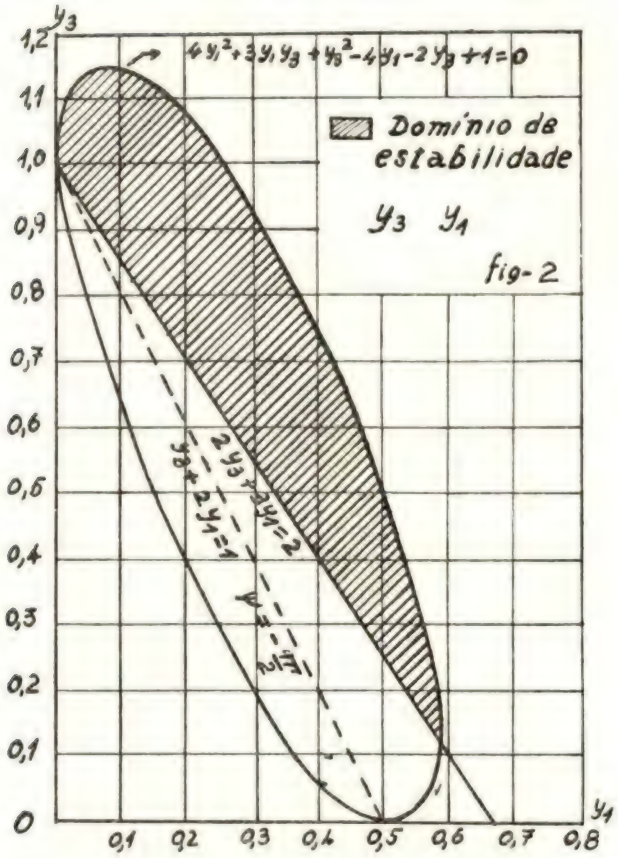
A primeira condição conduz a $\varepsilon > 0$ e é sempre satisfeita.

A segunda condição (24 b) tomará após transformações relativamente morosas a forma:

$$y_3^2 - 4\,y_1^2 + 4\,y_1 - (1 + k^2) > 0 \qquad (25)$$

Conjugando a equação (25) com a equação da família de elipses (18)

$$4\,y_1^2 + 3\,y_1\,y_3 + y_3^2 - 4\,y_1 - 2\,y_3 + (1 + k^2) = 0$$




Conclui-se (fig. 2) que a região de estabilidade é a posição de elipse correspondente à parte tracejada ou seja a parte superior à recta:

$$2\,y_3 + 3\,y_1 = 2$$

7 — Conclusões sobre o comportamento do conversor.

1 — Das relações (14) concluímos que deve ser:

$$\left(\frac{1}{9} - \alpha\right) > 0$$

ou seja:

$$\frac{1}{9} - \left(a + \frac{1}{L}\right)\frac{1}{\omega^2 C} > 0$$

o que equivale a:

$$\frac{\omega}{3} > \sqrt{\frac{1}{C}\left(a + \frac{1}{L}\right)}$$

o que exprime a possibilidade de existência dum regime livre de pulsação $\frac{\omega}{3}$ no sistema constituído pelo paralelo das bobinas $B_1$ $B_2$ e condensador C, condição essencial para a operação de arranque.

Desta relação obtemos ainda a existência duma frequência crítica abaixo da qual não se poderá obter a referida desmultiplicação e que é:

$$fc = \frac{3}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{C}\left(a + \frac{1}{L}\right)}$$

2 — Da relação

$$k \leq \sqrt{\frac{1}{7}}$$

$$k = \frac{\varepsilon}{3}\;\frac{1}{\frac{1}{9} - \alpha}$$

$$\varepsilon = \frac{1}{R\omega C}$$

Conclui-se que:

$$R \geqslant \frac{\sqrt{7}}{3\omega C}\;\frac{1}{\left(\frac{1}{9} - \alpha\right)}$$

Portanto existe uma resistência abaixo da qual não se pode descer.

Esta resistência que chamamos crítica — $R_c$ — é na prática maior que o valor teórico pois que temos que atender à existência das diversas perdas que desprezamos.

As perdas no ferro acarretam ainda a existência duma frequência limite superior.

* * *

3 — Uma vez que a reactância do condensador é muito pequena para a frequência $f$ podemos numa análise aproximada admitir que $e_c$ é só constituída pela componente da sub-harmónica:

Obtendo-se as soluções aproximadas:

$$e_K \simeq \frac{d\varphi_1}{dt}$$

$$e_{B1} = \frac{d\varphi_1}{dt} + \frac{d\,\varphi^{1/3}}{dt}$$

$$e_C \simeq -\frac{d\,\varphi^{1/3}}{dt}$$

Concluindo-se daqui que

$$x_1 \simeq \frac{E_K}{\omega}$$

$$x_3 \simeq \frac{3}{\omega} E_C$$

Dentro desta aproximação:

$x_1$ é a imagem de $E_K$

$x_3$ é a imagem de $E_C$

A relação que interessa conhecer para o conversor é a que traduz a dependência entre $E_k \rightarrow E_c$. Portanto essa relação pode estabelecer-se a partir de $x_1$ e $x_3$

$$\frac{E_c}{E_k} \simeq \frac{1}{3}\,\frac{x_3}{x_1} = \frac{1}{3}\sqrt{\frac{y_3}{y_1}}$$

Esta relação é importante pois dá-nos uma ideia dos valores da tensão que podemos obter a partir duma dada tensão $E_k$.

Denominaremos esta equação, por equação característica do conversor.

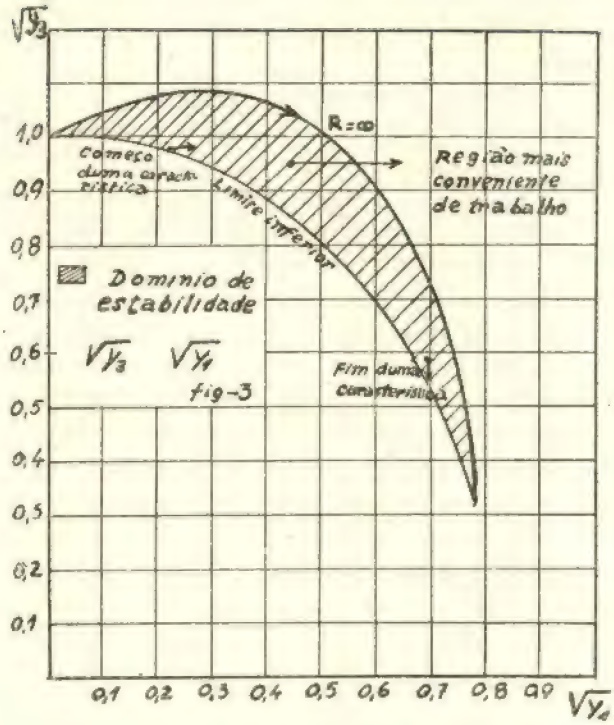
Na fig. 3 representamos o domínio de estabilidade no plano $\sqrt{y_3}$ $\sqrt{y_1}$ o que nos dá uma ideia das características $E_c = f(E_k)$ uma vez que o limite superior desse domínio representa a característica para $R = \infty$.

Qualquer outra característica terá um andamento semelhante iniciando-se e terminando no limite inferior do domínio.

Na fig. 4 representamos características experimentais $[E_{cef}\ E_{kef}]$ que mostram ser coerentes com os resultados teóricos.

Na prática obtém-se para $x_3/x_1$ valores mais elevados dos que se podem determinar das fig. 2 e 3.

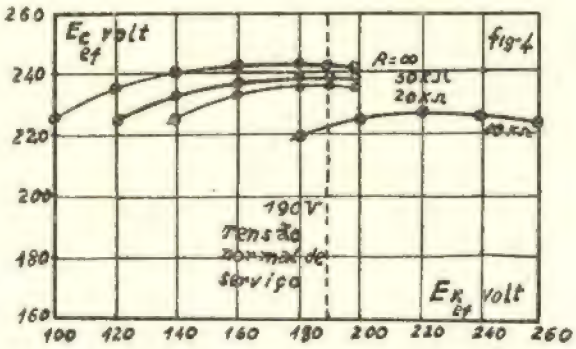
Isto porque uma representação exacta do grau de saturação exigiria para a expressão de i termos de ordem superior a $\varphi^3$.




4 — O facto de a uma dada resistência corresponder um intervalo finito $[y_{1m}\ y_{1m}]$ onde é possível obter-se a sub-harmónica significa a existência dum intervalo de tensões $[E_{Km}\ E_{KM}]$.

5 — As melhores condições de trabalho correspondem à região onde $\sqrt{y_3}$ é máximo.

O «Syncycle» trabalha nestas condições como se pode observar da fig. (4).




6 — A utilização do «Syncycle» faz-se por intermédio dum enrolamento secundário.

Apresenta duas saídas:

A saída (1-2) faz reflectir directamente no primário a carga que se imponha no secundário e portanto não se pode descer

abaixo duma resistência limite à qual corresponde no primário a resistência crítica.

A saída (3-4) pode por-se em c c sem que por isso se afecte a estabilidade.

Obtém-se uma característica decrescente que apresenta vantagens de ordem prática constituindo uma protecção de c.c. evitando ainda que o regime se torne instável.

No secundário existe ainda uma resistência $\tau$ suficientemente elevada para não carregar o sistema, mas suficientemente baixa para que se possa evitar o estabelecimento de sobre-tensões devido ao fenómeno de «ferro-ressonância» que se poderia estabelecer na ocasião do arranque.

## 7 — Resultados experimentais

Procedemos a alguns ensaios sobre uma unidade cujas características são:

Syncycle
Synchronous converter
Type 5. B. 1
Saída 75 V 5 W $16^2/_3$ $H_z$
Entrada 90-260 V 40 VA 50 $H_z$

Convém notar que a tensão de entrada representa a tensão à entrada do auto-transformador. A tensão $E_K = 190$ $V_{ef}$.

Por outro lado 75 V representa a tensão nos terminais (3,4) em plena carga.

Em vazio obtém-se em (1,2) uma tensão de 90 Volts.

Como a relação de transformação é 2,6/1, a tensão no condensador será:

$$90 \times 2{,}6 = 235 \textit{ volts}$$

1 — Operação de arranque:

No oscilograma (1) representa-se a corrente $i_L$ no primário do transformador $T_2$.

Representa-se ainda a tensão $e_K$.

Partimos dum valor de $E_K$ próximo do valor mínimo de arranque.

Crescendo lentamente $E_K$ chega-se a um ponto em que se obtém o regime estável da sub-harmónica $1/_3$.

Como se pode observar a oscilação é quase sinusoidal e de frequência próxima da $f/_3$.

No oscilograma (1 a) estudamos o arranque para o valor normal da tensão após a qual interrompemos a tensão, de novo repelimos a operação. Verifica-se um arranque fácil.

Obtiveram-se dois tipos de oscilação permanente.

A direita é o regime normal.

A esquerda obtemos uma oscilação de frequência $f/_3$ conjuntamente com uma oscilação de baixa frequência que não é síncrona com a $f/_3$.

Este estado anormal é muito instável desaparecendo espontâneamente por vezes.

Quando se carrega o transformador o fenómeno extingue-se degenerando logo na solução normal.

Uma vez no estado normal não se é conduzido a este estado. Apenas aparece raras vezes na altura do arranque.

Basta diminuir ligeiramente a tensão $E_K$ para que já não se observe.

2 — Instabilidade de funcionamento:

No oscilograma (2) apresentamos a corrente i na bobina $B_1$ e a tensão $e_K$.

A região central representa $E_K$ = Normal.

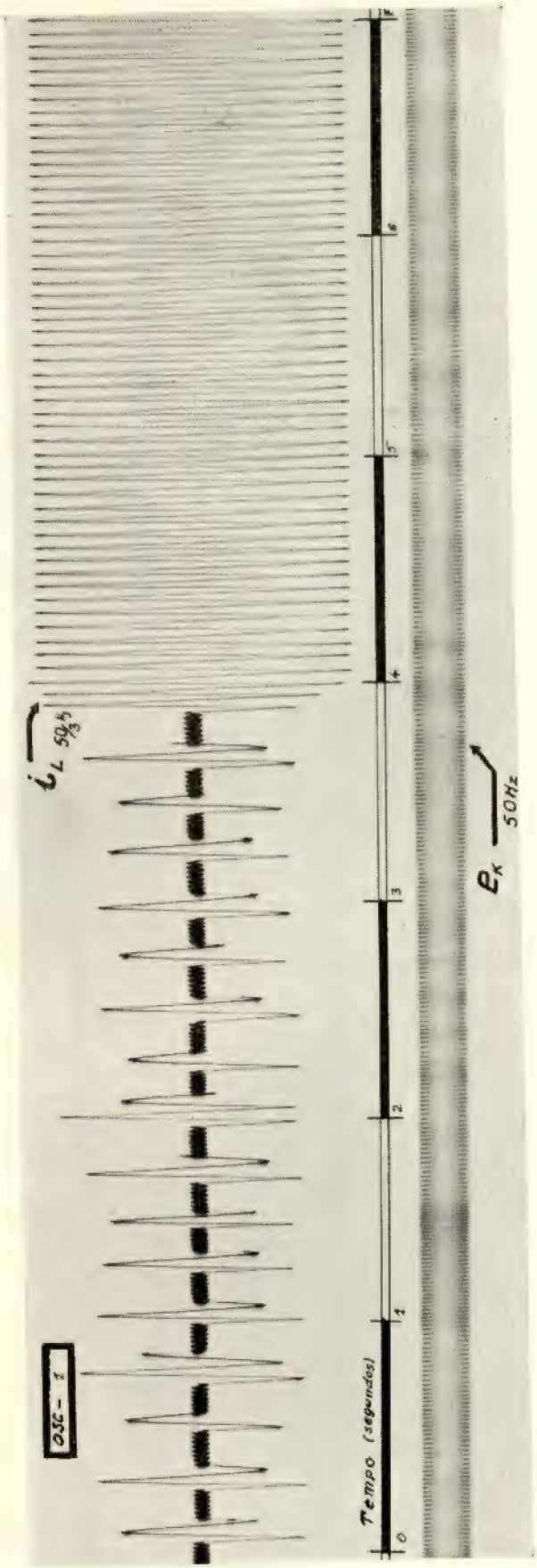
Aumentando $E_K$ a corrente torna-se assimétrica aparecendo, segundo podemos concluir de experiências anteriores, uma componente contínua no fluxo a qual pode ser positiva ou negativa e dá origem que esta assimetria possa ser num sentido ou noutro.

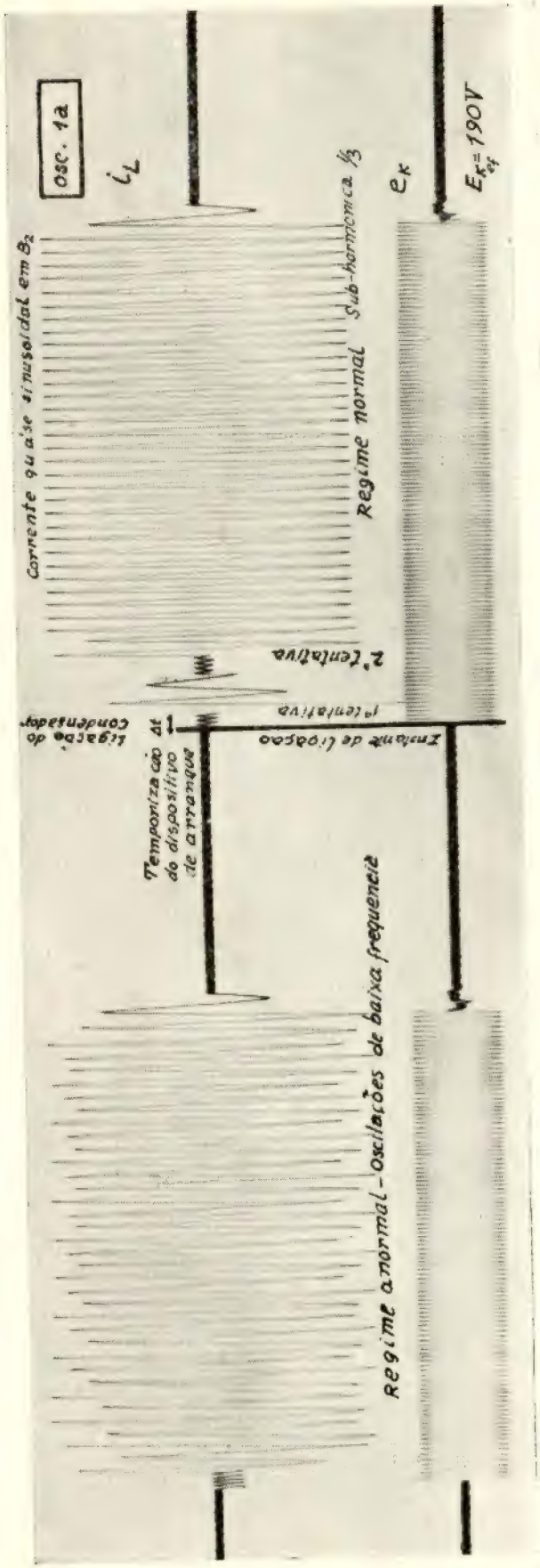
Por vezes a mudança duma assimetria para a outra dá-se ràpidamente e de modo irregular conduzindo a oscilações que podem comprometer a manutenção do regime que, embora alterado ainda continua a ser uma sub-harmónica $f/_3$ embora apareça a sub-harmónica par $\frac{2f}{3}$.

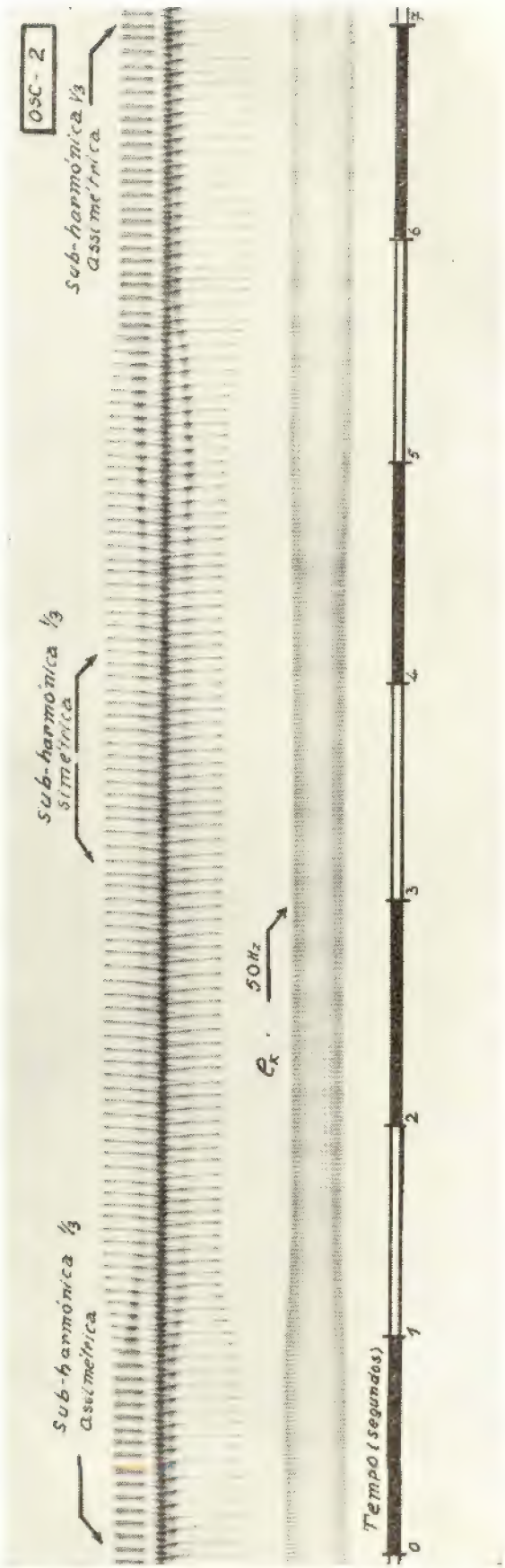
3 — Interrompemos a bobina $B_2$, deixamos apenas a bobina $B_1$.

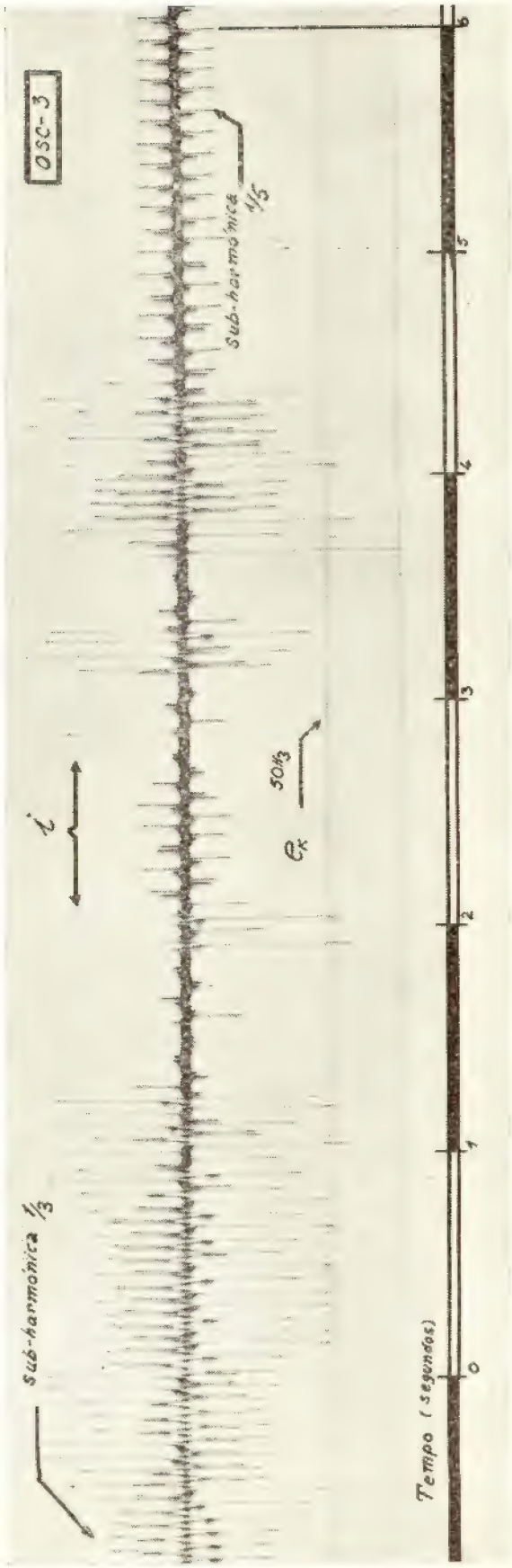
Neste circuito, que se reduz ao circuito série, já se torna possível com facilidade o aparecimento doutro tipo de sub-harmónica.

A frequência das primeiras oscilações já não é necessàriamente próxima de $f/_3$.


OSC - 1
$i_L$ 50/3
Tempo (segundos)
0
1
2
3
4
5
6
7
$e_K$
50Hz


OSC. 1a
$i_L$
Corrente quase sinusoidal em $B_2$
Sub-harmonica 1/3
Regime normal
$e_K$
$E_{K_{ef}}$ = 190V
2ª tentativa
1ª tentativa
Ligação do condensador
Instante de ligação
Temporização Δt do dispositivo de arranque
Regime anormal - oscilações de baixa frequencia


OSC- 2
Sub-harmónica 1/3 assimétrica
Sub-harmónica 1/3 simétrica
Sub-harmónica 1/3 assimétrica
50Hz
$e_k$
Tempo (segundos)
0
1
2
3
4
5
6
7

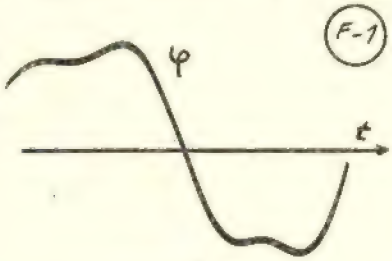

OSC- 3
Sub-harmónica 1/5
Sub-harmónica 1/3
50Hz
$e_k$
$i$
Tempo (segundos)
0
1
2
3
4
5
6

Apresentamos um oscilograma da corrente [osc — 3].

Partimos dum estudo em que se tinha um regime $f/_3$.

Forçando a tensão caímos num estado instável do tipo de assimetrias variáveis.

Após várias interrupções obtivemos finalmente a sub-harmónica $1/_5$.



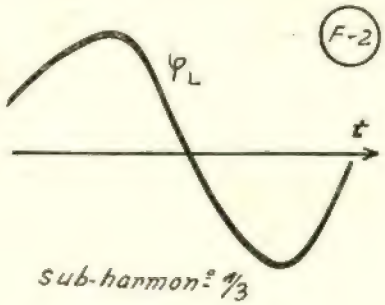

Sub-harmón.ª 1/3

Fluxo-Bobina $B_1$

* * *

Apresentamos na fot. 1 o fluxo total ligado com a bobina $B_1$.

Apresenta a forma típica que explica a possibilidade de existência da sub-harmónica $1/_3$ ou seja na origem dos tempos a harmónica em avanço em relação à sub-harmónica.




Sub-harmon.ª 1/3

Fluxo Bobina $B_2$

Apresentamos na fot. 2 o fluxo ligado com a bobina $B_2$.

Como se vê é quase sinusoidal o que prova que na realidade a bobina $B_2$ não intervem como elemento não linear essencial à manutenção do regime.

C. D. 621.311.15/9

# Elementos sobre a produção e o consumo de energia na rede eléctrica nacional

— Elementos extraídos das estatísticas mensais do Repartidor Nacional de Cargas (R. N. C.) preparadas nos Serviços do R. N. C. a cargo da Companhia Nacional de Electricidade —

NOTA: *A produção e o consumo da rede das empresas do R. N. C. representam actualmente cerca de 90 % dos respectivos totais do País.*

## JANEIRO

### I — Elementos gerais

*a*) Mensais (mês de Janeiro)

$10^6$ kWh

| | 1953 | 1954 | Variação % |
|---|---|---|---|
| Produção hidráulica ($P_h$) | 124,7 | 132,6 (2) | + 6 |
| Produção térmica ($P_t$) . . | 4,9 | 5,6 (3) | + 14 |
| Produção total ($P_T$) . . . | 129,6 | 138,2 | + 7 |
| Cons. electroquímico ($C_{eq}$) | 28,5 | 26,3 | — 8 |
| Outros consumos ($C_T - C_{eq}$) | 84,5 | 93,8 | + 11 |
| Consumo total ($C_T$) (1) . . | 113,0 | 120,1 | + 6 |

*Notas:*

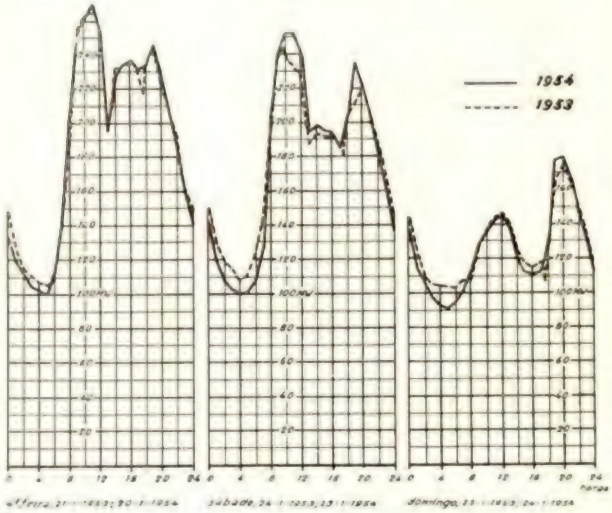
(1) No consumo total ($C_T$) estão incluídas as perdas nas redes de transporte e de distribuição.

(2) 96 % $P_T$.

(3) 4 % $P_T$.

### II — Diagramas de carga da produção

| | 4.ª feira: 21-1-953; 20-1-954 | |
|---|---|---|
| | 1953 | 1954 |
| Produção hidráulica ($P_h$) — MWh | 4.487 | 4.329 |
| Produção térmica ($P_t$) — MWh . . | 130 | 302 |
| Produção total ($P_T$) — MWh . . . | 4.617 | 4.631 |
| Utilização da ponta (U) — horas | 17,4 | 17,1 |
| Factor de carga (α) . . . . . | 0,73 | 0,71 |
| Relação $\frac{\text{Pot. mín.}}{\text{Pot. máx.}}$ (r) . . . . . | 0,40 | 0,37 |




### III — Energia armazenada nas albufeiras

| Albufeira | Energia armazenada | |
|---|---|---|
| | $10^6$ kWh | % |
| Venda Nova . . . . . | 58,5 | 51,8 |
| Salamonde . . . . . | 4,9 | 36,1 |
| Guilhofrei . . . . . | 1,0 | 12,2 |
| Lagoa Comprida . . . . . | 11,3 | 38,4 |
| Santa Luzia . . . . . | 16,2 | 47,7 |
| Castelo do Bode . . . . . | 110,5 | 67,5 |
| Pracana . . . . . | 6,5 | 62,9 |
| Póvoa . . . . . | 4,9 | 37,5 |

C D. 624.04.001.57

# Vista geral sobre o estado presente do método experimental de dimensionamento das estruturas(*)

POR MANUEL ROCHA
Engenheiro Investigador, Chefe do Serviço de Estruturas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

## SUMÁRIO

*Este trabalho pretende dar uma vista de conjunto sobre as possibilidades actuais de dimensionamento de uma estrutura a partir da observação de modelos.*

*Começa-se por referir a conhecida deficiência dos métodos analíticos, acentuando-se quanto ela é flagrante quando se pretende fazer a previsão do comportamento de uma estrutura fora do domínio elástico, previsão cuja necessidade e imposta pelos modernos conceitos de segurança.*

*São referidas brevemente as condições de semelhança estabelecidas noutro trabalho do autor com toda a generalidade. Tais condições definem as exigências a que devem satisfazer as formas, os materiais e as solicitações dos modelos, em equilíbrio estático ou dinâmico, qualquer que seja o estado de deformação.*

*Quanto à construção dos modelos, é discutido o problema da escolha das escalas a adoptar e são apresentadas as propriedades dos materiais utilizados na construção de modelos, em especial dos materiais elásticos. São também referidas as técnicas seguidas para a aplicação de solicitações aos modelos.*

*Expõe-se os métodos de determinação dos deslocamentos, das extensões e das tensões desenvolvidas nos modelos. Quanto à determinação das extensões indicam-se as vantagens e inconvenientes dos tipos de extensómetros correntemente usados. Refere-se a determinação das isostáticas pelo método da pintura com vernizes frágeis.*

*São apresentados os métodos especiais para o estudo de modelos de estruturas constituídas por peças lineares os quais têm especial interesse para o estudo de estruturas só exteriormente hiperestáticas.*

*O método da fotoelasticidade é muito brevemente considerado.*

*Finalmente são apresentadas as conclusões nas quais se referem as possibilidades e as exigências dos métodos experimentais.*

## 1. Confronto entre os métodos experimentais e analíticos de dimensionamento das estruturas

Ao abordar-se o método de dimensionamento das estruturas a partir da observação de modelos surge logo o problema da sua posição em face dos métodos analíticos da Teoria da Elasticidade e da Resistência de Materiais, os quais encerram o saber humano sobre o comportamento dos sólidos submetidos a solicitações que tem sido possível interpretar e exprimir quantitativamente, isto é, que tem sido teorizado.

Os métodos analíticos de dimensionamento que, como todas as teorias físicas, têm a grande virtude de fornecer o conhecimento de todos os fenómenos de um dado domínio, fornecem, digamos, um conhecimento denso. Uma teoria permite preencher as clareiras deixadas entre o conhe-

(*) Versão em português do trabalho «General view of the present status of the experimental method of structural design» apresentado ao 4.º Congresso da Associação Internacional de Pontes e Estruturas que teve lugar em Cambridge, Inglaterra, em 1952.

cimento dos casos isolados que levaram à sua estruturação, e, mais do que isso, permite mesmo ir além dos fenómenos observados numa medida que marca o arrojo da teoria.

Assim, a teoria da flexão da Resistência de Materiais, que tem prestado inestimáveis serviços ao homem, quer do ponto de vista da segurança das construções quer da economia de materiais, tem permitido prever o comportamento de um ilimitado número de peças que quanto aos materiais, formas, dimensões e solicitações, nunca anteriormente tinham sido objecto de observação.

Em oposição aos métodos analíticos de dimensionamento, o método experimental fornece o conhecimento de casos isolados, havendo necessidade de construir e observar um modelo por cada estrutura a estudar. Isto em esquema, pois há sempre, pelo menos qualitativamente, uma teorização dos fenómenos a qual permite prever o comportamento de estruturas com características não muito diversas das de outras já anteriormente estudadas.

Quanto aos métodos analíticos a questão que se levanta é a seguinte: permitem eles, no seu estado actual, prever o comportatamento das estruturas com aproximação satisfatória?

Ora os métodos analíticos fornecem resultados aplicáveis a sólidos com dadas formas e submetidos a certos tipos de solicitações e, além disso, salvo poucas excepções, são estabelecidos admitindo que os materiais são homogéneos, isótropos e obedecem à lei de Hooke. Mas, precisamente por serem teorias, dão a possibilidade de que seja tentada a sua aplicação para além do domínio para que foram estabelecidas e então a aproximação dos resultados obtidos diminui podendo cair-se em previsões extremamente grosseiras.

Assim, quanto às formas das estruturas, que são de uma variedade infinita, o projectista aplica constantemente as teorias a sólidos com formas muito diversas daquelas para que foram estabelecidas. Além disso, divide as estruturas em partes cujas acções recíprocas umas vezes despreza e outras vezes arbitra, considerando-as como articulações, encastramentos, etc.

Quanto às solicitações também é frequente a necessidade de profundas esquematizações com o fim de as converter em solicitações de efeito calculável.

Referimos ainda que as teorias de cálculo admitem em geral a hipótese de que os materiais seguem a lei de Hooke. Dentro da concepção de segurança hoje geralmente seguida, segundo a qual para dadas solicitações, fixadas como solicitações de serviço, as tensões desenvolvidas não devem exceder as tensões de segurança, aquela hipótese não tem por via de regra uma repercussão importante nos resultados dos cálculos em face das provenientes das simplificações das formas e dos tipos de solicitações. Tal resulta de serem pequenos os desvios do comportamento dos materiais de construção correntes em relação à lei de Hooke, isto é, os encurvamentos dos diagramas tensões-extensões, até aos valores das tensões correntemente adoptados para tensões de segurança. Para estas tensões também a fluência dos materiais não se repercute a maior parte das vezes na distribuição das tensões de modo a ter de ser considerada.

Porém, quer para a aplicação do conceito probabilístico de segurança, actualmente a despertar*,[1] [2] quer para a do conceito de segurança em relação à rotura, ao qual já se recorre com alguma frequência, a hipótese dos materiais seguirem a lei de Hooke tira todo o valor à quase totalidade das teorias de cálculo existentes.

De facto, dentro da concepção probabilística há necessidade de prever o comportamento das estruturas para todas as intensidades possíveis das solicitações, mesmo para as pouco prováveis para as quais as estruturas poderão sofrer deformações que ultrapassem largamente a fase das deformações elásticas ou sofrer mesmo roturas. As dimensões a atribuir a uma estrutura serão aquelas para as quais seja mínima a soma do custo inicial e do custo de utilização da estrutura, devendo incluir-se neste último as despesas de reparação motivadas

* Ver referências no final do texto.

pela acção de cargas de grande intensidade e ainda as despesas motivadas por qualquer prejuízo como as devidas a deformações excessivas, a acidentes pessoais, etc.

Para a aplicação do conceito de segurança em relação à rotura é necessário determinar as intensidades das solicitações que determinam a rotura.

Pode bem dizer-se que são muito reduzidas as possibilidades de previsão do comportamento das estruturas para tais deformações, o que resulta das grandes dificuldades analíticas que surgem quando se têm de considerar relações não lineares entre as componentes dos estados de tensão e deformação, situação que é agravada pela necessidade que simultâneamente aparece de considerar a dependência dos fenómenos da variável tempo.

Foi precisamente a dificuldade do estabelecimento de teorias não lineares associada ao facto das estruturas sofrerem em geral deformações inconvenientes para a sua utilização quando é ultrapassada francamente a fase das deformações elásticas, que conduziram ao deficiente conceito de segurança baseado na consideração de solicitações de serviço.

Como o projectista até há poucas décadas não dispunha para o dimensionamento das estruturas, além do conhecimento do comportamento de estruturas análogas e da sua intuição, senão dos métodos analíticos, ele tinha necessidade quer de estabelecer as hipóteses necessárias, por mais extraordinárias que fossem, para obrigar a cair os problemas a resolver dentro das teorias de que dispunha, quer mesmo de escolher não as soluções mais convenientes mas as susceptíveis de serem tratadas por esses métodos.

Desta situação, associada à dificuldade de confronto entre as previsões dos métodos analíticos, em especial quanto aos valores das deformações e das tensões, e o comportamento real das estruturas, resultou criar-se uma confiança excessiva na precisão dos métodos analíticos e mesmo, por vezes, um certo convencionalismo na sua aplicação.

O progressivo aperfeiçoamento das técnicas de medição de deformações e de tensões e o aparecimento de novos materiais adequados à construção de modelos, permitiram um grande desenvolvimento do método experimental de dimensionamento das estruturas, especialmente na última década.

Quando os métodos analíticos não são satisfatórios, é hoje em geral possível prever com a necessária aproximação, e dentro de prazos e dispêndios razoáveis, o comportamento das estruturas, quer em fase elástica quer fora dela, recorrendo a modelos.

No artigo seguinte vão ser expostas brevemente as condições de semelhança a que devem satisfazer os modelos. Essas condições foram estabelecidas no trabalho «Dimensionnement expérimental des constructions» [3].

## 2. Semelhança mecânica

a) *Modelos constituídos pelos mesmos materiais dos protótipos* — Consideremos um protótipo constituído por materiais quaisquer, fig. 1, homogéneos ou heterogéneos, isótropos ou anisótropos, os quais para as solicitações actuantes não obedecem à lei de Hooke. Suponhamos esse protótipo em equilíbrio estático sob a acção de forças de superfície $F'_p$, $F''_p$ . . . , designadas genèricamente por $F_p$, e de reacções de apoios, fixos ou móveis, $R'_p$, $R''_p$, . . . , designadas genèricamente por $R_p$.

Construamos um modelo geomètricamente semelhante à escala $\frac{1}{\lambda}$, constituído pelos mesmos materiais do protótipo ligados do mesmo modo e apoiado sobre apoios homólogos do mesmo tipo (fig. 1). Submetamo-lo a forças homólogas $F_m$ à escala $\frac{1}{\lambda^2}$, $F_m = \frac{1}{\lambda^2} F_p$, a que correspondem tensões de superfície $f_m$ iguais às tensões homólogas do protótipo $f_p$, $f_m = f_p$.

Os deslocamentos de pontos homólogos do protótipo e do modelo $\delta_p$ e $\delta_m$, as extensões de segmentos homólogos, $\varepsilon_p$ e $\varepsilon_m$, e as tensões em facetas homólogas, $t_p$ e $t_m$, estão relacionadas por

$$\delta_m = \frac{1}{\lambda}\,\delta_p$$

$$\varepsilon_m = \varepsilon_p \qquad (1)$$

$$t_m = t_p$$

qualquer que seja a grandeza das deformações, mesmo que se dêm roturas, e o carácter estável ou instável do equilíbrio. As reacções dos apoios do modelo são dadas por $R_m = \frac{1}{\lambda^2} R_p$, isto é, as tensões homólogas de reacção, $r_p$ e $r_m$, são iguais, $r_m = r_p$.

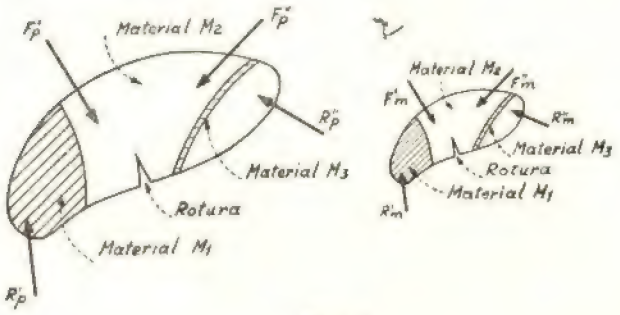



Fig. 1

Disse-se que os apoios têm de ser do mesmo tipo, isto é, aos apoios fixos, articulações ou encastramentos do protótipo terão de corresponder no modelo apoios fixos do mesmo tipo, e aos apoios com deslocamento apoios com deformabilidade tal que, sob a acção de solicitações $R_m = \frac{1}{\lambda^2} R_p$, ou $r_m = r_p$, sofram deslocamentos $\frac{1}{\lambda}$ dos deslocamentos sofridos pelos apoios do protótipo quando submetidos à acção de $R_p$ ou $r_p$.

Como é óbvio, as condições de semelhança enunciadas só subsistem quando os estados iniciais de tensão e de deformação do modelo forem os mesmos do protótipo.

Quanto à acção de forças mássicas, como o peso, não subsiste a semelhança a não ser que se recorra a artifícios cujo efeito seja converter a escala das forças mássicas homólogas em $\frac{1}{\lambda^2}$, isto é, no caso do peso, equivalentes a multiplicar por $\lambda$ os pesos específicos dos materiais do modelo. Para isso podem aplicar-se ao modelo forças complementares ou submetê-lo a um movimento de rotação que origine um campo de forças centrífugas de intensidade conveniente.

No caso de equilíbrios dinâmicos também não se verifica a semelhança mesmo que haja sòmente a considerar a acção de forças de superfície.

Quanto aos efeitos de solicitações, tais como as variações de temperatura e de humidade, que tendem a provocar variações de volume, subsistem as relações (1) desde que a variação unitária de volumes homólogos seja igual, o que implica, no caso da temperatura, a imposição ao modelo de variações de temperatura iguais às sofridas pelos pontos homólogos do protótipo.

As condições de semelhança enunciadas só subsistem quando se admite que, se os elementos de volume de um modelo estão submetidos ao mesmo estado de tensão (em geral variável no tempo) dos elementos homólogos do protótipo, o estado de deformação é também o mesmo em elementos homólogos mesmo para deformações na vizinhança da rotura. Sendo o estado de tensão no modelo o mesmo do protótipo, dois pontos homólogos encontram-se mergulhados em meios com estados de tensão análogos mas nos quais o gradiente, numa direcção qualquer, das tensões homólogas toma no modelo valores $\lambda$ vezes maiores.

Portanto as conclusões apresentadas foram tiradas admitindo que a relação entre o estado de tensão e de deformação de um elemento de volume não depende do gradiente de tensões que reina em torno desse elemento. No caso dos sólidos em deformação elástica a Teoria da Elasticidade admite mesmo a hipótese, que tem sido amplamente verificada, de que a relação entre o estado de tensão e de deformação de um elemento de volume não depende do estado de tensão em torno desse elemento.

Porém, quando se sai do campo elástico é concebível, sobretudo quando se trate de materiais dúcteis, que aquela relação dependa do estado de tensão que reine em torno do elemento de volume, que varie mesmo quando só varia o gradiente do estado de tensão.

A averiguação experimental da influência

do gradiente de tensões tem conduzido com frequência a resultados discordantes. No caso dos aços, que têm sido os materiais mais estudados, são mais numerosos os resultados que mostram a existência dessa influência [4] [5].

Deve contudo notar-se que a influência do gradiente de tensões nas relações de semelhança só poderá ser importante para deformações muito grandes e para valores da escala inferiores a certos limites, havendo a ter-se em conta o equilíbrio em estudo e a precisão com que se deseje conhecer os resultados.

Outra objecção a apresentar às conclusões expostas resulta da consideração da influência do volume sobre a probabilidade de rotura [6], a qual tem sido observada para os materiais frágeis [7] e para a rotura frágil dos materiais dúcteis [8] quando submetidos a tensões de tracção. A tensão média de rotura por tracção varia com o volume da peça, dando-se uma diminuição dessa tensão quando o volume aumenta.

Portanto, quando se deseje fazer estudos sobre modelos nos quais se produzam roturas por tracção, poderá ser necessário ter tal efeito em consideração, tanto mais que existe a possibilidade das conclusões tiradas do modelo não estarem do lado da segurança. No entanto, como a maior parte das vezes as estruturas constituídas por materiais frágeis são concebidas de tal modo que as roturas devidas a tensões de tracção não as ponham em risco, a objecção que se acaba de levantar deve ter pequena importância.

Num dado caso, para averiguar se existe influência da escala e qual a repercussão dessa influência, pode proceder-se à observação de modelos a escalas diversas e ao confronto dos valores observados por intermédio das expressões (1).

Salvo casos especiais, cremos que a influência do gradiente de tensões e do volume sobre a probabilidade de rotura não limitam as conclusões tiradas quanto à semelhança a ponto de terem de ser consideradas nas aplicações.

b) *Modelos constituídos por materiais diferentes dos dos protótipos* — Acontece muitas vezes, como se verá no art. 3, não ser possível ou não ser mesmo conveniente construir os modelos com os mesmos materiais do protótipo.

Consideremos ainda o caso geral do protótipo da fig. 1 constituído por materiais quaisquer. Sejam $\varepsilon_p$ as extensões sofridas por um paralelipípedo elementar de qualquer dos materiais quando é submetido nas suas faces a tensões $t_p$ que se equilibrem.

Para que num modelo, geomètricamente semelhante, se observem deslocamentos, tensões e extensões proporcionais aos homólogos do protótipo é, em primeiro lugar, necessário [3] que os materiais do modelo sejam tais que, quando se submete um paralelipípedo elementar a tensões $t_m = \frac{t_p}{\alpha}$, as extensões desenvolvidas sejam $\varepsilon_m = \frac{\varepsilon_p}{\beta}$, designando por $\alpha$ e $\beta$ constantes. Quando tiver de ser considerada a fluência dos materiais, então, sendo o estado de tensão $t_p$ atingido num instante $\theta_p$, o estado de tensão $t_m$ tem de ser atingido num instante $\theta_m = \frac{\theta_p}{\tau}$, designando por $\tau$ uma constante. Para os materiais do modelo têm portanto que existir escalas para as tensões, $\frac{1}{\alpha}$, para as extensões, $\frac{1}{\beta}$, e para os tempos, $\frac{1}{\tau}$.

A condição que se acaba de enunciar implica que, para qualquer dos materiais do modelo, o diagrama de solicitação uniaxial (tracção-compressão) em função das extensões (fig. 2) se obtenha do diagrama do material homólogo do protótipo multiplicando as ordenadas e as abcissas, respectivamente por $\frac{1}{\alpha}$ e $\frac{1}{\beta}$, isto é, por uma mudança de escalas dos eixos. Quando houver a ter em conta a fluência dos materiais esta relação dos diagramas tem de se verificar qualquer que seja a maneira como a solicitação aplicada ao material do protótipo evolui no tempo, podendo, como se afirmou, a solicitação do material do modelo ser aplicada a uma certa escala dos tempos.

A relação entre os diagramas de solicitação uniaxial que se referiu não é sufi-

ciente para se verificar a condição geral enunciada anteriormente, a qual se refere a uma solicitação qualquer. No entanto basta a maior parte das vezes constatar que aquela relação se verifica para se poder admitir com aproximação suficiente que os materiais do modelo satisfazem à condição geral. Além disso deve notar-se que, no

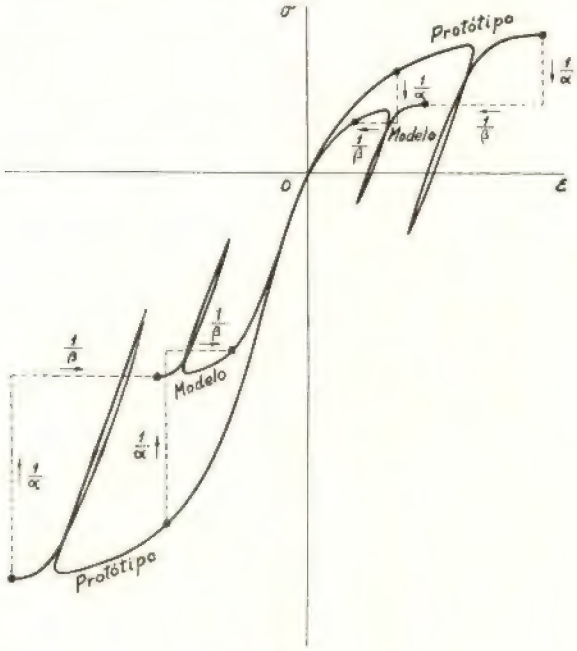



Fig. 2

caso de não ser imposta a verificação da referida relação até à rotura, basta que os diagramas tenham andamentos análogos para ser possível determinar, com aproximação razoável, factores $\frac{1}{\alpha}$ e $\frac{1}{\beta}$.

Se se desejar prever o comportamento do protótipo mesmo após o aparecimento de roturas, os materiais do modelo deverão satisfazer à condição enunciada para os estados de tensão que provocam a rotura do paralelipípedo. Será portanto necessário que nos diagramas da fig. 2 as tensões de rotura dos materiais homólogos estejam na relação $\frac{1}{\alpha}$, e que a elas correspondam deformações na relação $\frac{1}{\beta}$.

Apresentada a condição a que devem satisfazer os materiais do modelo vejamos as condições a satisfazer pelas solicitações.

No caso do protótipo estar submetido a forças de superfície $F_p$, em equilíbrio estático, se ao modelo à escala $\frac{1}{\lambda}$ forem aplicadas em instantes homólogos as forças homólogas $F_m = \frac{1}{\lambda^2 \alpha} F_p$, isto é, as tensões $f_m = \frac{1}{\alpha} f_p$, verificam-se em instantes homólogos as relações

$$\delta_m = \frac{1}{\lambda \beta} \delta_p$$

$$\varepsilon_m = \frac{1}{\beta} \varepsilon_p \qquad (2)$$

$$t_m = \frac{1}{\alpha} t_p$$

desde que os deslocamentos sejam pequenos e o modelo esteja apoiado anàlogamente ao protótipo. Assim, aos apoios com deslocamento tem de corresponder apoios tais que, sob a acção de solicitações $R_m = \frac{1}{\lambda^2 \alpha} R$ ou $r_m = \frac{1}{\alpha} r_p$, sofram deslocamentos $\frac{1}{\lambda \beta}$ dos sofridos pelos apoios homólogos do protótipo, quando sujeitos a $R_p$ ou $r_p$.

No caso de ser $\frac{1}{\beta} = 1$, isto é, dos materiais do modelo apresentarem as mesmas extensões dos materiais homólogos do protótipo para solicitações $t_m = \frac{1}{\alpha} t_p$, as relações (2) subsistem mesmo para grandes deslocamentos. Podem então estudar-se sobre modelo equilíbrios nos quais se observem fenómenos de instabilidade, sendo $\frac{1}{\lambda^2 \alpha}$ a escala das cargas críticas homólogas.

No caso geral do protótipo em equilíbrio dinâmico sob a acção de forças de superfície e de forças mássicas, em especial do peso próprio, para subsistirem em instantes homólogos as relações (2) é necessário que, além da condição relativa aos materiais e da condição das forças de superfície satisfazerem a $F_m = \frac{1}{\lambda^2 \alpha} F_p$ ou $f_m = \frac{1}{\alpha} f_p$, se verifiquem as relações

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\lambda}{\alpha} \qquad (3)$$

$$\frac{1}{\tau} = \sqrt{\frac{1}{\lambda \beta}} \qquad (4)$$

onde $\frac{1}{\rho} = \frac{d_m}{d_p}$, sendo $d_m$ e $d_p$ as massas específicas dos materiais do modelo e do protótipo. Em geral é difícil satisfazer a todas estas condições.

Quando se trata de vibrações, a escala dos períodos de oscilação homólogos é dada por (4).

No caso particular de serem desprezíveis os efeitos do peso próprio terá de se verificar sòmente a relação (4). Se, além disso, não houver a ter em conta efeitos de fluência o material não impõe a escala dos tempos e portanto a cada valor da escala do modelo corresponde um valor da escala dos tempos.

Quando se trata de equilíbrios estáticos em que há a considerar o efeito do peso próprio terá de se verificar sòmente a condição (3). Dados os valores correntes das escalas esta condição impõe que os materiais dos modelos tenham massa específica e deformabilidade elevadas.

Quanto ao efeito da temperatura ou de outras solicitações que tendam a provocar variações de volume, subsistirão as relações (2) desde que se imponha a cada ponto do modelo uma variação de temperatura $\Delta_m$ dada por

$$\Delta_m = \frac{\chi}{\beta} \Delta_p$$

onde $\Delta_p$ designa a variação de temperatura do ponto homólogo do protótipo, e $\frac{1}{\chi}$ a escala dos coeficientes de dilatação térmica.

Todas as conclusões expostas nesta alínea estão sujeitas, como é óbvio, às objecções formuladas na alínea anterior.

c) *Protótipo em deformação elástica* — Consideremos um protótipo constituído por diversos materiais, intimamente ligados, com módulos de elasticidade $E'_p$, $E''_p$, ..., e coeficientes de Poisson $\nu'_p$, $\nu''_p$, ... . Dos resultados apresentados na alínea anterior deduz-se que para existir semelhança é necessário que o modelo, geomètricamente semelhante, seja constituído por materiais cujas constantes elásticas homólogas, $E'_m$, $E''_m$, ..., e $\nu'_m$, $\nu''_m$, ..., satisfaçam a

$$\frac{E'_m}{E'_p} = \frac{E''_m}{E''_p} = \ldots = \frac{1}{\mu}$$

e

$$\nu'_m = \nu'_p \qquad \nu''_m = \nu''_p \ldots$$

designando por $\frac{1}{\mu}$ a escala dos módulos de elasticidade.

Visto a influência do coeficiente de Poisson nos estados de tensão e de deformação ser muitas vezes pequena, a condição de igualdade destes coeficientes pode com frequência deixar de ser considerada. Nesse caso, se o protótipo é constituído por um só material basta que o material do modelo seja elástico.

Quando o protótipo está submetido sòmente à acção de forças de superfície a escala destas forças, que representamos por $\frac{1}{\phi}$, pode ser qualquer desde que não seja ultrapassada a fase das deformações elásticas. As relações (2) tomam então a forma

$$\delta_m = \mu \frac{\lambda}{\phi} \delta_p$$

$$\varepsilon_m = \mu \frac{\lambda^2}{\phi} \varepsilon_p \qquad (5)$$

$$t_m = \frac{\lambda^2}{\phi} t_p$$

Aos apoios com deslocamento tem de corresponder apoios tais que sofram deslocamentos à escala $\mu \frac{\lambda}{\phi}$ quando sujeitos a reacções $R_m = \frac{1}{\phi} R_p$ ou $r_m = \frac{\lambda^2}{\phi} r_p$ .

No caso dos materiais do protótipo e do modelo seguirem a lei de Hooke até à rotura é possível estudar sobre modelo o efeito de solicitações que provoquem roturas desde que as tensões de rotura à tracção e compressão satisfaçam às condições

$$\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_p}\right)_{\text{tracção}} = \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_p}\right)_{\text{compressão}} = \frac{\lambda^2}{\phi}$$

as quais impõem um valor para a escala das forças. No caso dos estudos até à rotura, visto não subsistir a sobreposição dos efeitos das solicitações, é em geral necessário aplicar simultâneamente todas as solicitações.

No caso de grandes deslocamentos as conclusões tiradas nesta alínea subsistem desde que a escala das forças seja

$$F_m = \frac{1}{\lambda^2 \mu} F_p \quad \text{ou} \quad f_m = \frac{1}{\mu} f_p$$

tomando as expressões (5) a forma

$$\delta_m = \frac{1}{\lambda} \delta_p$$

$$\varepsilon_m = \varepsilon_p$$

$$t_m = \frac{1}{\mu} t_p$$

O modelo mantém-se após deformação geomètricamente semelhante ao protótipo. Podem então estudar-se sobre modelo fenómenos de instabilidade, estando as cargas críticas homólogas à escala $\frac{1}{\lambda^2 \mu}$.

No caso geral do protótipo se encontrar em equilíbrio dinâmico sob a acção de forças de superfície e mássicas, em especial do peso próprio, é necessário que os materiais do modelo satisfaçam às condições enunciadas e ainda que

$$\frac{1}{\phi} = \frac{1}{\lambda^3 \rho}$$

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \qquad (6)$$

Isto é, para dados materiais do protótipo e do modelo estão fixados os valores das escalas das forças e dos tempos. As forças homólogas têm pois de ser aplicadas em instantes à escala $\frac{1}{\tau}$ e o modelo deve partir de uma configuração inicial na qual os deslocamentos estejam à escala $\frac{\mu \lambda}{\phi}$ e as velocidades à escala $\frac{\mu \lambda \tau}{\phi}$.

Quando se trate de vibrações $\frac{1}{\tau}$ é a escala dos períodos de oscilação homólogos.

Quando não for necessário ter em conta o efeito do peso próprio as condições de semelhança só fixam a escala dos tempos. Uma vez arbitrada a escala das forças, a primeira relação (5) fixa a escala dos deslocamentos, e portanto também a configuração inicial do modelo na qual se têm de impor velocidades à escala atrás referida

No caso de equilíbrios estáticos em que haja a ter em conta simultâneamente o efeito de forças de superfície e do peso próprio terá de se verificar a primeira das relações (6).

Para as escalas correntes dos modelos é muitas vezes difícil o estudo dos efeitos do peso próprio dado o pequeno valor das deformações. Recorre-se por isso às vezes aos artifícios já referidos equivalentes a aumentar o valor dos pesos específicos.

d) *Equilíbrios elásticos a duas dimensões e equilíbrios de estruturas constituídas por peças lineares* — A Teoria da Elasticidade mostra que numa placa homogénea em equilíbrio estático elástico a duas dimensões o estado de tensão não depende do coeficiente de Poisson, a não ser que a placa seja multiplamente conexa e que no contorno exterior ou em qualquer dos interiores actuem forças cujo vector principal não seja nulo (forças não equivalentes a zero ou a um binário).

Por isso as condições referidas na alínea anterior para os materiais dos modelos simplificam-se no caso presente, bastando que esses materiais sejam elásticos. Deve contudo frizar-se que se os coeficientes de Poisson são diferentes as extensões e os deslocamentos homólogos não são proporcionais, isto é, a semelhança só subsiste para as tensões.

No caso da placa em equilíbrio a duas dimensões ter apoios hiperestáticos a não proporcionalidade dos deslocamentos que acabamos de referir traz como consequência que não há em geral semelhança mesmo quanto às tensões. Pela mesma razão, se a placa for constituída por diversos materiais elásticos só haverá semelhança quando subsistir a igualdade dos coeficientes de Poisson homólogos.

Se a placa estiver submetida a forças mássicas actuantes no seu plano, o estado de tensão é ainda em geral independente do coeficiente de Poisson quando as forças mássicas forem de intensidade constante, condição à qual satisfaz o peso próprio. No caso dos equilíbrios a duas dimensões é fácil, dada a pequena espessura da placa, aplicar ao modelo forças complementares equivalentes a um aumento do peso específico.

Recorrendo à analogia de Biot é possível determinar o efeito do peso próprio e, dum modo geral, de forças mássicas, substituindo estas forças por forças actuantes na periferia da placa[9].

Quando se deseje estudar a acção de variações de temperatura ou de outras causas que provoquem variações de volume, só se verifica a semelhança quando $\nu_m = \nu_p$, pois em tal caso é necessário introduzir condições relativas a deformações.

Deve notar-se que nos casos citados nos quais o estado de tensão depende do coeficiente de Poisson a influência deste coeficiente é geralmente pequena podendo a maior parte das vezes ser desprezada.

Nas peças em equilíbrio a deformação plana, a determinação das tensões pode ser feita fàcilmente a partir de uma placa em equilíbrio a duas dimensões, o que tem frequentemente interesse prático apreciável.

Consideremos finalmente o caso das estruturas em equilíbrio elástico constituídas por peças lineares, no plano ou no espaço, de eixo rectilíneo ou curvilíneo. Designamos abreviadamente essas estruturas por estruturas lineares.

Dentro das hipóteses simplificadoras da Resistência de Materiais é em geral possível fazer o estudo das estruturas lineares usando modelos constituídos por peças cujas secções transversais não são geomètricamente semelhantes às do protótipo[5]. Esta possibilidade tem grande interesse prático pois permite substituir as formas dessas secções, frequentemente muito complexas, por outras mais fáceis de reproduzir nos modelos.

Quando se usam modelos com secções não geomètricamente semelhantes às do protótipo só subsiste a proporcionalidade entre os esforços transversos, os esforços normais e os momentos flectores homólogos.

No caso particular das estruturas lineares planas em equilíbrio estático sob a acção de forças actuantes no seu plano, basta que se verifique ao longo de todas as peças proporcionalidade entre os momentos de inércia $I_p$ e $I_m$ de secções homólogas $\frac{I_m}{I_p} = \frac{1}{C}$.

Tal permite construir os modelos com secções rectangulares de espessura constante o que simplifica muito a construção dos modelos.

As forças podem ser aplicadas a uma escala qualquer $\frac{1}{\phi}$, sendo esta mesma a escala dos esforços transversos e dos esforços normais desenvolvidos e $\frac{1}{\lambda\phi}$ a escala dos momentos, designando agora $\frac{1}{\lambda}$ a escala dos eixos do protótipo e do modelo.

Nos equilíbrios dinâmicos sob a acção de forças de superfície e do peso próprio é em geral suficiente que, além da já mencionada proporcionalidade entre os momentos de inércia, as áreas $S_p$ e $S_m$ de secções homólogas sejam proporcionais, $\frac{S_m}{S_p} = \frac{1}{C_1}$, sendo $C_1$ constante ao longo de todas as peças.

A escala das forças aplicadas e dos tempos são dadas por

$$\frac{1}{\phi} = \frac{1}{\lambda \rho C_1}$$

$$\frac{1}{\tau} = \sqrt{\frac{\mu C}{\lambda^3 \phi}}$$

devendo o modelo partir de uma configuração com deslocamentos à escala $\frac{\mu C}{\lambda^3 \phi}$ e velocidades à escala $\frac{\tau C \mu}{\lambda^3 \phi}$. Quando não interessa a consideração do peso próprio a escala das forças pode ser qualquer.

### 3. Construção dos modelos

A semelhança mecânica impõe aos modelos, como se acaba de ver, condições quanto

à forma, aos materiais e às solicitações. Vejamos quais as possibilidades de satisfazer estas condições.

a) *Escalas* — Salvo casos especiais, a semelhança impõe que os modelos sejam geomètricamente semelhantes ao protótipo não fixando contudo o valor da escala.

A escala próxima da unidade tem a vantagem de permitir reproduzir no modelo, com toda a fidelidade, as características do protótipo, tais como, formas, ligações entre peças, tensões iniciais resultantes do processo de construção, etc.

Porém, no caso de estruturas de grandes dimensões, que são as mais correntes na engenharia civil, tal escala não pode ser em geral adoptada, quer por razões económicas quer pelo tempo que é necessário dispender com a construção do modelo. Além disso, em modelos de grandes dimensões a aplicação das solicitações exige montagens muito dispendiosas e as observações são muito demoradas, mais difíceis e menos precisas, sobretudo, se têm de ser realizadas ao ar livre.

A diminuição da escala arrasta dum modo geral economia, rapidez e facilidade dos estudos sobre modelos. Estes factores variam a maior parte das vezes muito acentuadamente com o valor da escala.

Para escalas muito pequenas levanta-se por vezes a dificuldade de reproduzir fielmente as formas. Deve no entanto notar-se que é em regra possível introduzir muitas simplificações nas formas, quer desprezando certos pormenores quer substituindo peças por outras com uma deformabilidade conveniente, sem que tal comprometa a precisão dos resultados. No caso de estruturas de grandes dimensões com formas simples chega-se a adoptar escalas como 1/500.

Na fixação do valor mínimo da escala que será possível adoptar é necessário ter em conta:

— as peças de menores dimensões a reproduzir no modelo às quais não devem ser dadas dimensões tão pequenas que seja difícil a sua construção e observação

— a precisão com que se pode realizar a montagem para aplicação de forças ou de outras solicitações

— a precisão, as dimensões e o modo de colocação da aparelhagem de medida, em especial as bases de medida dos extensómetros em face dos gradientes de deformação que se prevejam.

b) *Materiais* — Dum modo geral os materiais destinados à construção de modelos devem obedecer às seguintes condições:

— ter as propriedades mecânicas exigidas pela semelhança, não devendo estas propriedades ser apreciàvelmente influenciadas pelas variações correntes da temperatura e da humidade ambientes

— ser fàcilmente trabalhados e ligados

— ter deformabilidade tal que, sob a acção de solicitações com intensidade fàcilmente realizável, se atinja a precisão exigida na medição de deslocamentos e de extensões

— permitir fàcilmente a montagem, quer na superfície quer no interior, da aparelhagem necessária às medições

— ser económicos.

Quando se deseja estudar sobre modelo o comportamento de um protótipo em que haja a ter em conta propriedades mecânicas complexas, tais como relações não lineares entre tensões e deformações, deformações irreversíveis e fluência, deve averiguar-se em primeiro lugar a possibilidade do modelo ser constituído pelos mesmos materiais do protótipo. Tal é por vezes difícil mesmo para escalas não muito pequenas.

Assim, no caso de modelos de estruturas de betão armado aparece frequentemente a dificuldade das dimensões da brita serem excessivas. Além disso, utilizando no modelo o mesmo betão a semelhança poderá ser prejudicada pelo efeito parede e pela velocidade de secagem, os quais são mais acentuados no modelo.

Em modelos de estruturas metálicas, e também de betão armado, é muitas vezes difícil encontrar no mercado perfis, chapas e varões com as necessárias dimensões e com as mesmas propriedades dos aços usados na construção. Por isso é-se por

vezes obrigado a fabricar especialmente os perfis a partir de chapas laminadas até à espessura conveniente (fig. 3).

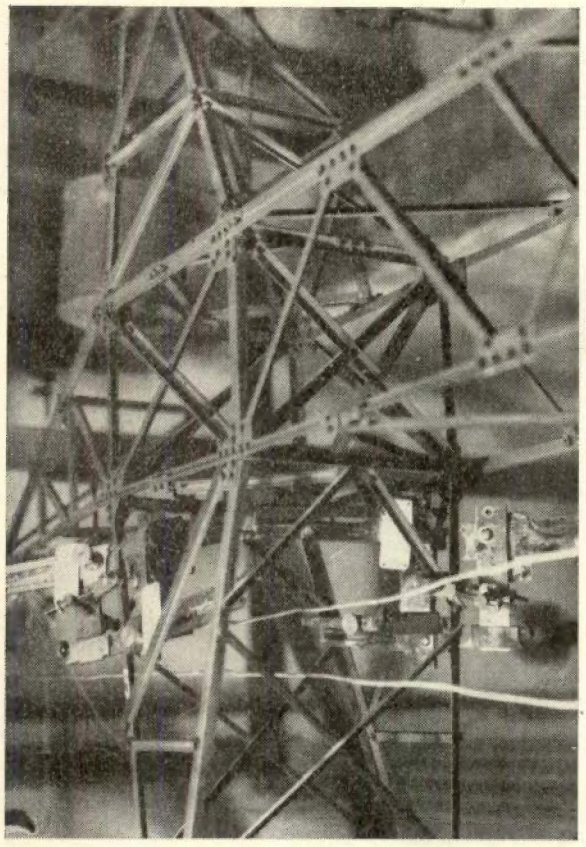


Fig. 3 — Vista parcial de um modelo, à escala 1/6, de um poste metálico com 33 m de altura para uma linha de alta tensão. As extensões foram medidas com extensómetros Huggeberger.

Quanto aos varões dos modelos de betão armado é em geral possível a substituição de grupos de ferros por um único ferro de modo a utilizar os diâmetros comerciais. As chapas e varões de pequenas dimensões existentes no mercado são muitas vezes recozidos mas é por via de regra possível conferir-lhes propriedades análogas às dos aços de construção, submetendo-os a uma estiragem.

No entanto, como se viu no artigo anterior, podem usar-se nos modelos materiais diferentes dos do protótipo.

Assim, no caso de estruturas de betão é fácil encontrar argamassas satisfazendo à condição enunciada (fig. 4). É conveniente que $\frac{1}{\alpha}$ seja pequeno e $\frac{1}{\beta}$ seja grande com o fim de obter, para pequenos valores das solicitações, deformações mensuráveis com precisão. Se se tratar de estruturas de betão armado o aço deve ser substituído por um material para o qual $\frac{1}{\alpha}$ e $\frac{1}{\beta}$ tenham os mesmos valores.

Quando se procede à escolha de materiais para o modelo diferentes dos do protótipo, basta em geral, como se referiu, verificar se a condição geral de semelhança (art. 2 b) é satisfeita em solicitação uniaxial. Pode ainda proceder-se ao ensaio de peças geomètricamente semelhantes, constituídas pelos

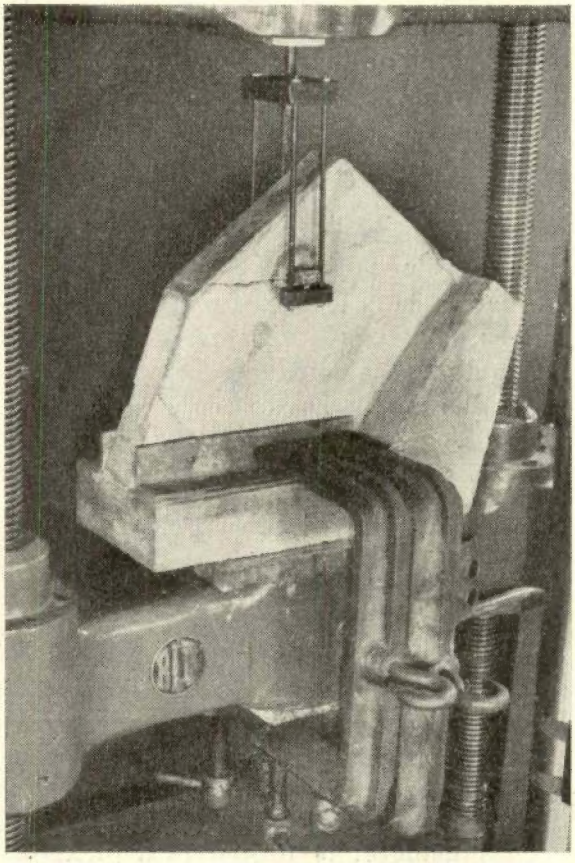


Fig. 4 — Modelo de argamassa armada, à escala 1/50, de um muro guia do evacuador de cheias de uma barragem. O modelo permitiu o estudo até à rotura da acção exercida pelas comportas.

materiais do protótipo e do modelo, as quais se submetem a solicitações homólogas à escala conveniente com o fim de constatar